

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

Nová koncepce řešení nástroje ECAP

Development New Conceptions of ECAP Die

Student:

Bc. Jiří Hluchník

Vedoucí diplomové práce:

prof. Ing. Stanislav Rusz, CSc.

Ostrava 2009

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB – TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě:.....

.....

podpis studenta

Adresa trvalého pobytu:

Jiří Hluchník

Píšť 352

747 18

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

HLUCHNÍK, J. Nová koncepce řešení nástroje ECAP. Ostrava: katedra mechanické technologie, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2009, 68 s. Diplomová práce, vedoucí Rusz, S.

Diplomová práce se zabývá využitím nového typu nástroje ECAP s pozměněnou geometrií výstupního kanálu. V úvodu jsou uvedeny nové poznatky technologií výroby materiálů s ultra jemnozrnnou strukturou. V práci jsou následně experimentálně ověřovány slitiny AlMn1Cu a AlFe1,5Mn na novém typu nástroje ECAP. Dále je provedena analýza vlivu počtu průchodů kanálem a vliv vychýlení horizontálního kanálu na dosaženou velikost přetvárného odporu. Podstatou práce je analýza těchto vlivů na výsledné zjemnění struktury a dále navržení vhodné metodiky vyhodnocení mechanických a tvářecích vlastností u krátkých vzorků.

V závěru jsou navrženy další oblasti vývoje tvářecích nástrojů a technologií využívajících vícenásobnou plastickou deformaci.

ANNOTATION OF THESIS

HLUCHNÍK, J. Development New Conceptions of ECAP Die. Ostrava: Department of Mechanical Technology, Faculty of Mechanical Engineering VŠB – Technical University of Ostrava, 2007, 68 p. Thesis, head: Rusz, S.

The thesis is dealing with utilization of new type ECAP die with modified geometry of output channel. In introduction there are description of new piece of knowledge technology production materials with ultra fine - grained structure. In the thesis are experimentally checks alloys AlMn1Cu and AlFe1,5Mn on new type ECAP die. Further is effected analysis influence of the number of passes through the channel and influence misalignment horizontal channel on achieved size of strain stress. The main aim of the thesis is analysis these influences on resulting refinement structure and further proposition fit methodists evaluation mechanical and forming properties of short specimens .

In the conclusion there are suggested next areas development of forming tools and of the technologies, which use severe plastic deformation.

Obsah diplomové práce

Seznam použitých symbolů a zkratk	8
ÚVOD	10
1 SOUČASNÝ STAV VÝVOJE NANOSTRUKTURNÍCH TECHNOLOGIÍ.....	11
1.1 Teoretické modely plastických deformačních procesů	
v nanokrystalických materiálech	11
1.1.1 Hall-Petchův vztah	11
1.1.2 Cobleův creep.....	12
1.1.3 Songův teoretický model.....	14
1.1.4 Teoretické modely Malygina a Valieva.....	15
1.1.5 Kimův teoretický model.....	16
1.2 Nanostrukturní SPD technologie.....	16
1.2.1 Vývoj technologií.....	16
1.2.2 Technologie ECAP.....	18
1.2.3 Technologie ECAP – Conform.....	24
1.2.4 Technologie Twist extrusion.....	26
1.2.5. Technologie CSPD ECAE/P	28
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	30
2.1 Výběr materiálů.....	30
2.2 Výběr maziva.....	32
2.3 Lis DP 1600 kN	33
2.4 Nástroj ECAP	35
2.5 Protlačování slitin AlMn1Cu a AlFe1,5Mn	37
3 ANALÝZA DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ	39
3.1 Vliv počtu průchodů na zpevnění materiálu.....	39

3.1.1	Slitina AlFe1,5Mn.....	39
3.1.2	Slitina AlMn1Cu	41
3.1.3	Srovnání výsledků obou slitin.....	43
3.2	Vliv změny geometrie na zpevnění materiálu.....	44
3.2.1	Slitina AlFe1,5Mn.....	44
3.2.2	Slitina AlMn1Cu	45
3.2.3	Srovnání výsledků obou slitin.....	47
3.3	Vyhodnocení struktury.....	48
3.3.1	Vyhodnocení struktury slitiny AlMn1Cu.....	48
3.3.2	Vyhodnocení struktury slitiny AlFe1,5Mn	48
4	METODIKA VYHODNOCENÍ MECHANICKÝCH A TVÁŘECÍCH VLASTNOSTÍ U KRÁTKÝCH VZORKŮ	50
5	CELKOVÉ VYHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ A NÁVRH DALŠÍHO VÝVOJE TECHNOLOGIÍ	54
5.1	Celkové vyhodnocení.....	54
5.2	Návrh dalšího vývoje.....	55
	Seznam použité literatury	56
	Seznam příloh	58
	Přílohy	60

Seznam použitých symbolů a zkratk

Označení	Popis	Jednotky
A	mezní konstanta	[-]
B	konvenční Cobleova konstanta	[-]
\tilde{b}	burgesův vektor	[-]
d	střední velikost zrna	[nm]
d	hlavní velikost zrna	[nm]
d^*	velikost zrna při Cobleovu creepu	[nm]
d_c	velikost zrna nanokrystalu	[-]
d_f	průhyb vzorku odpovídající síle F_b	[mm]
d_{max}	průhyb vzorku odpovídající síle F_{max}	[mm]
d_{peak}	maximální velikost zrna	[nm]
F	síla	[N]
F_c	Cobleova složka meze kluzu	[MPa]
F_{hp}	Hall Petchova složka meze kluzu	[MPa]
F_{max}	síla na maximu křivky	[N]
F_b	síla při úplné penetraci	[N]
$f_{c1,c2}$	podíl Cobleovy složky meze kluzu	[MPa]
f_{cr}	objemový lom krystalických zrn	[-]
f_{hp}	podíl Hall Petchovy složky meze kluzu	[MPa]
H	mikrotvrdost nanokrystalických materiálů	[-]
H_0	Hall Petchova konstanta nanomateriálů	[-]
H_{ic}	interkrystalická mikrotvrdost	[-]
k	konstanta (Hall Petchův spád)	[-]
m_v	velikost všech zrn	[nm]
p	parametr velikosti zrna	[-]
$R_{1,2,5}$	zaoblení	[mm]
$s_{In v}$	parametr velikosti zrna	[-]
β	Hall Petchova konstanta nynokrystalů	[-]
β	úhel stoupání	[°]
γ_0	mezifázová hranoční energie	[mJ.m ⁻²]
δ	minimální velikost zrna	[nm]

Δ	účinná tloušťka hranice zrna	[nm]
ε	deformace	[-]
ε_N	deformace pro N – cyklů	[-]
$\varepsilon_{vmstř}$	střední velikost ekvivalentní deformace	[-]
Φ	úhel přechodu dvou kanálů nástroje ECAP	[°]
φ	logaritmická deformace	[-]
σ	parametr velikosti zrna	[-]
$\sigma_{p\ max}$	maximální deformační odpor	[MPa]
τ	mez kluzu	[MPa]
τ_0	třecí napětí	[MPa]
τ_{max}	maximální deformační odpor	[MPa]
τ_n	normalizované napětí	[MPa]
τ_c	mez kluzu podle Coblea	[MPa]
$\tilde{\tau}$	mez kluzu matrice	[MPa]
ξ	podíl velikostí zrn	[-]
Ψ	úhel zaoblení přechodu kanálů	[°]
AFRL	Air Force Research Laboratory (Americká letecká výzkumná laboratoř)	
CONFORM	Continuous Extrusion Forming (Kontinuální vytlačování spojené s přechováním)	
CSPD	Continuous Severe Plastic Deformation (Kontinuální vícenásobná plastická deformace)	
ECAP	Equal Channel Angular Pressing (Protlačování rovnostranným pravoúhlým kanálem)	
ECAE/P	Equal Channel Angular Extrusion/Pressing (Protahování/protlačování rovnostranným pravoúhlým kanálem)	
SAED	Selection Area Electron Diffraction (Elektronový difraktogram)	
SPD	Severe Plastic Deformation (Vícenásobná plastická deformace)	
TE	Twist Extrusion (Protlačování kanálem ve tveru šroubovice)	
TEM	Transmission Electron Microscope (Transmisní elektronový mikroskop)	
UFG	Ultra Fine Grain (ultra jemnozrnná struktura)	

ÚVOD

Materiály s ultra jemnozrnnou strukturou, jejich výroba a vývoj technologií vícenásobné plastické deformace, patří k předním oblastem výzkumu na světě. Jedná se především o tváření neželezných kovů a jejich slitin. V současné době se už však zpracovávají i železné materiály a oceli na experimentální úrovni. Neželezné kovy jsou velmi dobře recyklovatelné a nahrazují stále ve větším měřítku oceli. Jejich výhoda spočívá hlavně v mnohem nižší hmotnosti než u železných materiálů.

Celkový zájem o nanostrukturní materiály ohromně vzrostl v posledních dvou desetiletích. Po stejnou dobu byly vyvíjeny technologie pro jejich výrobu. Tyto materiály najdou uplatnění například ve zdravotnictví, strojírenství, automobilovém, vojenské i kosmickém průmyslu.

Ultra jemnozrnné materiály se vyznačují vyjímečnými mechanickými vlastnostmi. Po zpracování SPD technologiemi mají mnohem vyšší pevnost, odolnost proti únavě a současně jsou dobře tvařitelné. Představují novou generaci pokročilých materiálů. Konstrukční prvky vyrobené z těchto materiálů jsou schopny přenášet větší zatížení a tím zvyšují bezpečnost celých konstrukcí. Mez kluzu u materiálů s ultrajemnou strukturou je definována jako poměr meze kluzu fáze vnitřku zrna a fáze jeho okrajů, který silně závisí na objemovém lomu fáze hranic zrna [1].

Požadované struktury lze dosáhnout v závislosti na teplotně-deformačních podmínkách a napěťových podmínkách tvářecího procesu, průběhu deformace, geometrii nástroje, počtu opakovaných deformací, optimální velikosti rychlosti deformace a mazacích podmínkách .

V Rusku bylo na počátku devadesátých let vyvinuto několik metod k produkci ultra jemnozrnných materiálů [5]. U těchto metod je využívána velmi vysoká, vícenásobná plastická deformace (Severe Plastic Deformation). Ukázalo se, že pomocí této vysoké deformace, za nízkých homologických teplot, je možno vyrobit nanokrystalické kovové materiály. Významným rysem těchto procesů je zachování rozměrů polotovaru během procesu tváření (nedochází ke změně průřezu).

1 SOUČASNÝ STAV VÝVOJE NANOSTRUKTURNÍCH TECHNOLOGIÍ

1.1 TEORETICKÉ MODELÝ PLASTICKÝCH DEFORMAČNÍCH MECHANISMŮ V NANOKRYSTALICKÝCH MATERIÁLECH

Modely nanokrystalických materiálů jsou dvoufázové kompozity popisující jejich mechanické vlastnosti s pomocí tzv. pravidla směsi. Teoretické modely jsou založeny na představách tradičního dislokačního pohybu mřížky v nanozrnných jádrech, jako dominantní deformační mechanismus v nanokrystalických materiálech. Dále pojednávají o plastickém toku v nanokrystalických materiálech. Převážně jsou popsány pomocí deformačních mechanismů, ve spojení s aktivní účastí hranic zrn. Takovéto deformační mechanismy se týkají smyku v hranicích zrn, difusní plastické mechanismy souvisejí s difuzí hranic zrn [2,3]. Mez kluzu u nanokrystalických materiálů je poměr meze kluzu fáze vnitřku zrna a fáze jeho okrajů, který silně závisí na objemovém lomu fáze hranice zrna [2,3].

Základním hlediskem teoretických modelů je popis závislosti zrna na mezi kluzu v nanokrystalických materiálech. Teoretické modely jsou založeny na strukturálních charakteristikách nanokrystalických materiálů, na vysokém objemu dislokací na hranicích zrn a na deformačním chování nanokrystalických materiálů [2].

1.1.1 Hall-Petchův vztah

Jeden ze specifických prvků deformačního procesu v nanokrystalických materiálech se projevuje v odchylkách ze známého vztahu měřítka velikosti zrna [2]. Hall-Petchův vztah popisuje vztah mezi τ - mezí kluzu a střední velikostí zrna d , polykrystalického materiálu:

$$\tau = \tau_0 + kd^{-\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

kde τ_0 je třecí napětí, potřebné k pohybu jednotlivých dislokací a k je konstanta (často jako Hall-Petchův spád a je materiálově závislá). Tato rovnice je určena pro zrna větší než jeden mikron. Masumura vyjadřuje některé z dostupných dat v Hall-Petchově diagramu [2]. Je zřejmé, že mez kluzu – exponent velikost zrna se jeví pro velké zrna, být velmi blízko hodnotě -0,5 a tento trend pokračuje do doby, než je dosažen stav velmi jemného zrna.

1.1.2 Cobleův creep

Předpokládá se, že polykrystaly s relativně velkou průměrnou velikostí zrna se řídí klasickým Hall-Petchovým vztahem [2]. Pro velmi malé velikosti zrn, se předpokládá, že Cobleův creep je činný a že τ vs. d vztah je dán

$$\tau_c = A/d + Bd^3 \quad (2)$$

kde B je závislé na teplotě a rychlosti deformace. Další člen A/d (mezní člen) může být velký jestliže d je v rozsahu nanometrů. Pro střední velikost zrn, oba mechanismy mohou být aktivní jestliže má vzorek rozsah rozložení velikosti zrna.

Dále se předpokládá že, velikost zrna d^* existuje při těch hodnotách, při kterých se klasický Hall-Petchův mechanismus mění na Cobleův creepový mechanismus [2], $\tau_{hp} = \tau_c$ při $d = d^*$. Použitím rovnic (1) a (2), dostaneme

$$k(d^*)^{-1/2} = A/d + B(d^*)^3 \quad (3)$$

Z které může být d^* určeno. Potom je mez kluzu po zprůměrování dána jako

$$\langle \tau - \tau_0 \rangle = F_{hp} + F_c \quad (4)$$

Kde

$$F_{hp} = \frac{1}{m_v} \int_v^{\infty} \tau_{hp} dv \quad (5)$$

a

$$F_c = \frac{1}{m_v} \int_v^{\infty} \tau_c dv \quad (6)$$

Definujeme

$$\xi = \frac{d}{d^*} \text{ a } \sigma = s_{\ln v} \quad (7)$$

a

$$p = \frac{A/d}{B(d^*)^3} \quad (8)$$

Po úpravě tvaru normalizované meze kluzu, τ_n , jako funkci velikosti zrna v měřítku ξ , parametr velikosti zrna σ a p ,

$$\tau_n = \frac{2}{k(d^*)^{-1/2}} < \tau - \tau_0 > = f_{hp} \frac{pf_{c1} + f_{c2}}{1 + p} \quad (9)$$

Parametr p je procento Cobleova mezního napětí ke konvenčnímu napětí vyjádřeného při d^* , kde nastane přechod z Cobleova creepu do Hall-Petchova zpevnění. Pro každé p a σ je získána universální křivka. Rovnice (9) je klíčový výsledek této analýzy.

Tento model využívá konvečního Hall-Petchova zpevnění pro větší zrna a Cobleův creep s mezním napětím pro menší zrna. V materiálu s distribucí velikostí zrna se lom zrn deformuje pomocí procesu dislokačního skluzu a zbytek pomocí přesunu vakancí [2].

Když průměrná velikost zrna klesá, lom deformující se skluzem se snižuje a celková odezva se mění od zpevnění k měknutí. Určitá forma meze kluzu oproti křivce velikosti zrna závisí na relativních hodnotách Hall-Petchova zkosení k , konvenční Cobleově konstantě B , mezní konstantě A a šířka rozložení zrna β [2].

Cobleův creep, hraje důležitou roli vedoucí plnějšímu pochopení Hall-Petchova vztahu přes celý rozsah velikostí zrn. Dále je nereálné předpokládat, že neomezená pevnost je dosažitelná jednoduše pomocí zmenšení velikosti zrna, ačkoliv v některých materiálech, může být dosaženo nanokrystalickým procesem značné zpevnění. Další zpevnění je v podstatě možné, jestliže může být Cobleův creep jakkoliv redukován.

1.1.3 Songův teoretický model

Song vyznačil dvě odvětví závislosti hranice zrna na mezi kluzu [2]. Jedno je realizováno při velkých velikostech zrn ($d > d_{cr}$), které je popsáno klasickým Hall-Petchovým vztahem (1). Při malých velikostech zrna ($d < d_{cr}$), následuje model Songa [2] nanokrystalického materiálu chovající se jako souvislý precipitát zpevněné dvoufázové slitiny, ve které fáze hranic zrn hraje roli matrice, a každé ze zrn se usazuje do matrice souvisle. V této oblasti je mez kluzu dána vztahem:

$$\tau = \tilde{\tau} + \frac{\gamma_0}{\tilde{b}} f_{cr} \quad (10)$$

kde $\tilde{\tau}$ označuje mez kluzu matrice (fáze hranic zrn) bez překážek (zrna), γ_0 je mezifázová hraniční energie, \tilde{b} je Burgersův vektor velikosti, která charakterizuje dislokaci hranic zrn jako nosiče plastického toku v matrici a f_{cr} je objemový lom krystalických zrn (hrající úlohu překážek pro dislokace hranic zrn), který může být přibližně popsán tímto způsobem:

$$f_{cr} = \left(\frac{d - \Delta}{d} \right)^3 \quad (11)$$

Kde Δ je účinná tloušťka hranice zrn a d je hlavní velikost zrn. Rovnice (10) a (11) zodpovídá za experimentální data abnormálního Hall-Petchova vztahu při některých hodnotách parametrů modelu [2]. Nicméně, použití vzorce (10), který původně popisuje zpevnění konzistentních precipitátů dvoufázových slitin je sporné v případě nanokrystalických materiálů, protože je založen na předpokladu, že nosiči plastického toku v matici (hranice zrn) a soudržně uložené částice sekundární fáze (zrna) jsou stejné. Tento předpoklad je velmi diskutabilní. Krystalické nano-zrna a struktury hranic zrn jsou různé, obsahují dislokace se zásadně rozdílnými vlastnostmi [2].

1.1.4 Teoretické modely Malygina a Valieva

Valiev zmínil creepový mechanismus, ve kterém potřebují dislokace specifické množství času, aby byly pohlceny hranicemi zrn. Takové časy zahrnují specifickou délku 30 nm. Je přibližnou vzdáleností, při které dislokace „mizí“. Ale detailní mechanismus týkající se τ s d v této oblasti není dostupný [2].

Malygin poskytl právě takovou teorii založenou na dislokačním mechanismu [2]. Hustota dislokací $\rho(d)$ při nějaké velikosti zrna d souvisí obvyklým způsobem s plochou meze kluzu a získáme vyjádření, které spojí ρ do velikosti zrna. Výraz je založen na předpokladu, že hranice zrna účinkují převážně jako poklesy pro dislokace. V Malyginově modelu, jak se zrna stávají jemnější a jemnější, stále více dislokací je absorbováno hranicemi zrn což vede nakonec k poklesu hustoty dislokací. S tímto modelem byly zjištěny problémy. Je nejisté, jestli dislokace hrají stejnou roli jestli jsou zrna velká nebo malá. Je více pravděpodobné, že dislokace v ultrajemných zrnech, pokud jsou vůbec přítomná, se nachází v hranicích zrn [2]. Za druhé, v Malyginově modelu [2], vypočítané napětí je spíše zpevňující deformační napětí než mez kluzu.

1.1.5 Kimův teoretický model

Kimův teoretický model vychází z existence velikosti zrna nanokrystalu d_c . Daný model vychází z pravdivosti Hall-Petchova vztahu (1). Platí pouze pro variantu, kdy $d \geq d_c$, v menších zrnech platí ($d \leq d_c$). Není zahrnut žádný zpevňující účinek a režim ideální plasticity, který je realizován pokud je mikrotvrdość konstantní a nezávisí na velikosti zrna, je vyjádřen vztahem (13) [2].

$$H = \begin{cases} (H_0 + \beta d^{-1/2})f_{cr} + H_{ic}(1 - f_{cr}), & \text{jestliže, } d \geq d_c \\ (H_0 + \beta d_c^{-1/2})f_{cr} + H_{ic}(1 - f_{cr}), & \text{jestliže, } d \leq d_c \end{cases} \quad (12)$$

$$d_{pedk} = \left[\frac{3\delta}{\beta}(H_o - H_{ic}) + \sqrt{\left[\frac{3\delta}{\beta}(H_o - H_{ic}) \right] + 7\delta^2} \right] \quad (13)$$

Docházelo k významným odchylkám mikrotvrdości dle Hall-Petchova vztahu (1) a pokles v oblasti malých velikostí zrn. Tyto případy jsou vysvětleny pomocí zvláštnosti interakcí dislokačního skluzu podél hranic zrn s překážkami. Model difuzního toku byl považován za mechanismus plasticity hranic zrn [2]. Při malých velikostech zrn je difúze hranic zrn dominantním deformačním mechanismem. U hrubozrnných materiálů je hlavním mechanismem dislokačního skluzu deformační rychlost [2].

1.2 NANOSTRUKTURNÍ SPD TECHNOLOGIE

1.2.1 Vývoj technologií

Materiálům s průměry zrn menšími než 1 μm , byla věnována pozornost v minulých dvou desetiletích. Tyto materiály byly klasifikovány jako ultra jemnozrnné (Ultra Fine Grain, UFG) materiály s průměry zrn řádově 100 až 1000 nm a nano-materiály se středními průměry zrna menšími než 50 nm. Tento výzkum zahrnul celkovou produkci UFG materiálů, využívající velkou vícenásobnou plastickou

deformaci (Severe Plastic Deformation, SPD).

Ultra jemnozrnné materiály se vyznačují těmito důležitými vlastnostmi jako je vysoká pevnost při nízkých tvářecích teplotách, při zachování velmi dobré tvařitelnosti. Touto kombinací vlastností se UFG materiály stávají velmi atraktivními. Tyto materiály nacházejí využití – buď přímo jako polotovary pro další zpracování se sníženým počtem operací (vytvořená struktura je zachována ve finálních výrobcích) nebo jsou z polotovaru vyráběny finální produkty [1].

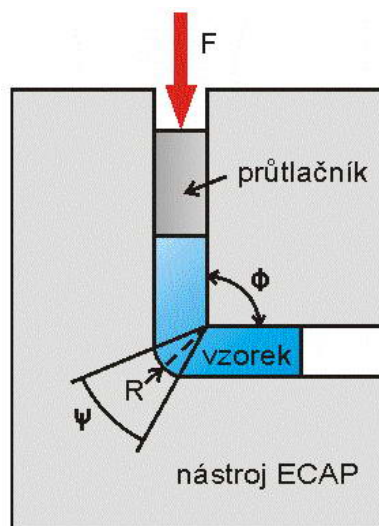
Technologie vícenásobné plastické deformace, mohou být definovány jako procesy, které v kovu vyvolají velmi vysoký stupeň deformace, za účelem zjemnění zrna [1]. Tyto nové technologie výroby polotovarů s ultra jemnozrnnou strukturou se odlišují od klasických technologií. U klasických technologií dochází ke změně jejich příčného průřezu, kdežto při SPD zpracování zůstává rozměr příčného průřezu zachován. Několik SPD technologií, sloužících k produkci UFG kovů, bylo vyvinuto již začátkem devadesátých let. K nejčastěji používaným a nově se vyvíjejícím metodám přináležej:

- ECAP** Equal Channel Angular Pressing (Protlačování rovnostranným pravoúhlým kanálem)
- ECAP - Conform**..... Continuous Equal Channel Angular Pressing (Kontinuální protahování rovnostranným pravoúhlým kanálem)
- TE** Twist Extrusion (Protlačování kanálem ve tvaru šroubovice)
- CSPD ECAE/P** Continuous Severe Plastic Deformation and Equal Channel Angular Extrusion or Pressing (Kontinuální velká plastická deformace a protahování nebo protlačování rovnostranným pravoúhlým kanálem)

1.2.2 Technologie Equal Channel Angular Pressing (ECAP)

Podstatou tohoto protlačování je extrémní deformace vzorků kruhového nebo čtvercového průřezu uskutečněná čistým stříhem. Tuto metodu navrhl jako první V. M. Segal se svými spolupracovníky v 70.–80. letech minulého století a o její rozvoj se zasloužil především R. Z. Valiev. Cílem metody je silné přetvoření materiálu bez změny průřezu vzorku [4,7].

U metody ECAP je vzorek vícekrát protlačován nástrojem, ve kterém se protínají dva na sebe navazující kanály, svírající úhel obvykle 90° – Obr. č. 1.1. Protlačování se realizuje buď při pokojové teplotě, nebo pro tvrdé materiály při teplotě zvýšené [4,7].



Obr. 1.1 Princip technologie ECAP: znázornění střížné deformační roviny a pracovních úhlů.

Velikost deformace vzorku při každém průchodu je závislá na vnitřním a vnějším úhlu kanálů. V případě, že úhel $\psi = 0^\circ$, může být příspěvek stříhového napětí při každém průchodu vypočten podle vztahu (14) [7]:

$$\varepsilon = \left[\frac{2 \cdot \cot g \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) + \Psi \cdot \cos ec \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right)}{\sqrt{3}} \right] \quad (14)$$

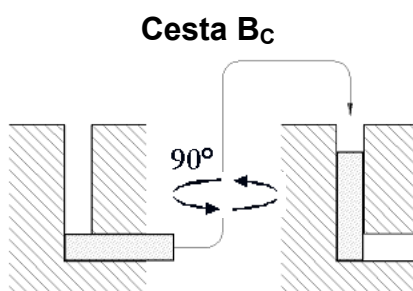
Pro případ, že úhel není roven nule, předložili Y. Iwahashi pro výpočet deformace vztah (15) [7]:

$$\varepsilon_N = N \cdot \left[\frac{2 \cdot \cot g \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) + \Psi \cdot \cos ec \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right)}{\sqrt{3}} \right] \quad (15)$$

Pro běžně používané úhly $\varphi = 90^\circ$ a $\psi = 20^\circ$ se po každém průchodu hodnota vložené deformace přibližně rovná 1.

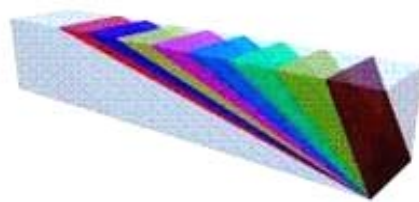
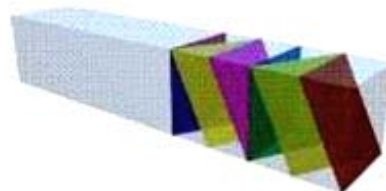
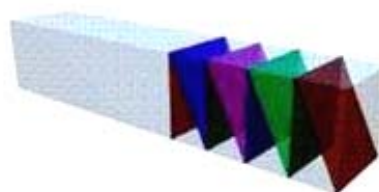
Výběr deformační cesty a počet průchodů jsou důležitými faktory pro vývoj mikrostruktury a výsledné vlastnosti materiálu. Při protlačování vzorku po sobě následujícími průchody je možné jeho rotací po každém průchodu měnit charakteristiky stříhového namáhání [4,7].

Při kanálovém protlačování je možné použít čtyři různé deformační cesty protlačování. Nejpoužívanější způsoby průchodu jsou cesta A (žádné pootočení), cesta B_C (pootočení o vždy 90° po každém průchodu) a cesta C (pootočení o 180° po každém průchodu). Nejvýhodnější cestou z hlediska jednotnosti deformace, byla experimentálně ověřená cesta B_C, obr. 1.2 [1].



Obr. 1.2 Nejčastěji používaný způsob protlačení nástrojem ECAP.

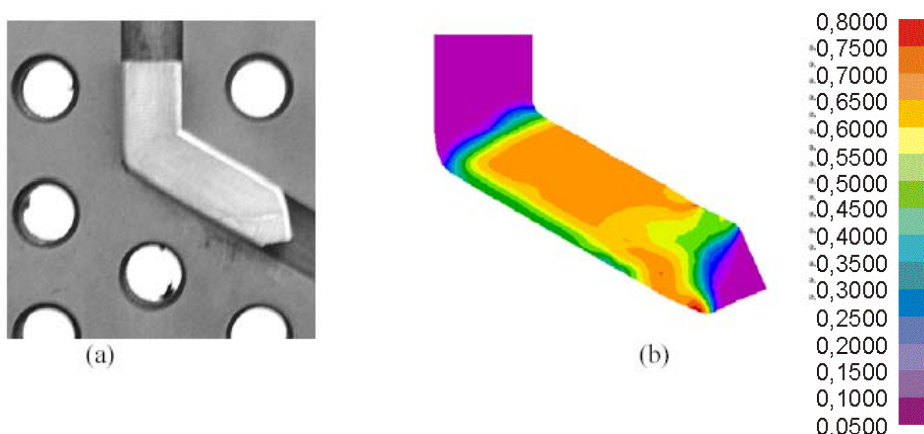
Na Obr. 1.3 jsou znázorněny střížné roviny u jednotlivých deformačních cest protlačování, závislé na počtu průchodů.

Cesta A: 0° **Cesta B_C: $+90^\circ$** **Cesta C: $+180^\circ$** *Obr. 1.3 Střížné roviny u jednotlivých deformačních cest protlačování.*

Z analýzy stříhových charakteristik při různých deformačních cestách vyplynulo, že cesta BC, při použití úhlu $\varphi = 90^\circ$, je optimální pro vznik ultrajemných rovnoosých zrn oddělených vysokoúhlými hranicemi [6].

Důležitým faktorem, který výrazně ovlivňuje rozvoj mikrostruktury, je úhel φ , který svírají podélné osy kanálů. Tento úhel určuje velikost stříhové deformace v jednotlivých průchodech. Menší úhel φ má za následek vyšší stříhovou deformaci při každém protlačení a toto uspořádání je tudíž účinnější při zjemňování zrn. Zjistilo se, že zjemnění zrn je nejúčinnější, při stejném objemu deformace, při úhlu 90° . Pro obtížněji tvařitelné materiály se obvykle používá úhel $\varphi 120^\circ$ a vyšší teplota protlačování [6].

Při průchodu deformační zónou se provádějí analýzy dosažené max. velikosti intenzity deformace a jejího rozložení, taktéž i intenzity napětí (deformačního napětí). Na Obr. 1.4 [1] je zobrazen nástroj ECAP a vzorek v průběhu protlačování. Je zde také znázorněna grafická simulace deformace během procesu.



Obr. 1.4 Proces ECAP: a) nástroj ECAP a částečně protlačený vzorek, b) intenzita deformace v jednotlivých oblastech vzorku.

Z obrázku simulace procesu ECAP je zřejmé, že velikost deformace je na většině místech stejně velká. Dochází ale k nerovnoměrnému rozložení deformací po průřezu vzorku (například na okrajích, ve střední a přední části vzorku).

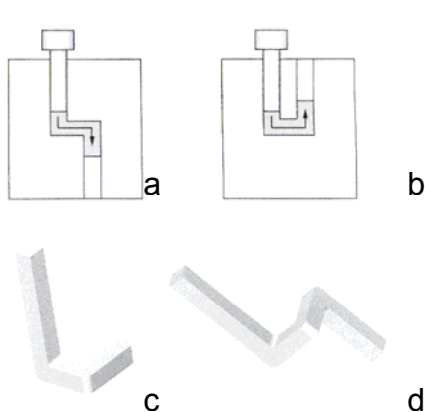
Vývoj technologie ECAP vede ke zvětšení vyráběných polotovarů jak z hlediska jejich průřezů, tak i délek (výzkum - US Air Force Research Laboratory, AFRL) v Ohio. Zde bylo zkonstruováno zařízení ECAP, které je schopné zpracovávat vzorky o velikosti průřezu 50 mm x 50 mm. Přičemž většina vědeckých informací popisujících SPD a ECAP, je založena na protlačování vzorků o velikosti průřezu 10 mm x 10 mm a menší [1]. Na Obrázku 1.5 je názorná ukázka vzorků různých velikostí.



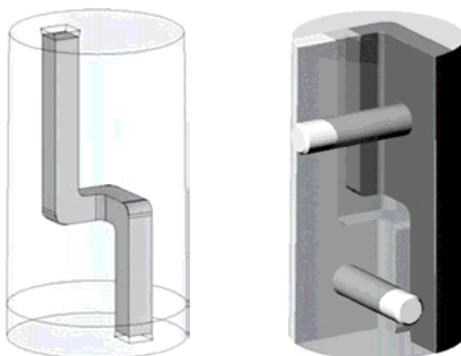
Obr. 1.5 Vzorky o velikostech příčného průřezu: 12 mm x 12 mm, 50 mm x 50 mm a 100 mm x 100 mm.

V současné době se nesnažíme nejen o zvětšení vzorků, ale i o výrobu nástroje, který umožní na jeden průchod dosáhnout větší stupně deformace a jemnější strukturu. Vzorek, který je protlačený takovýmto nástrojem by se mohl vyrovnat dvěma až třemi průchodům klasickým ECAP nástrojem [5].

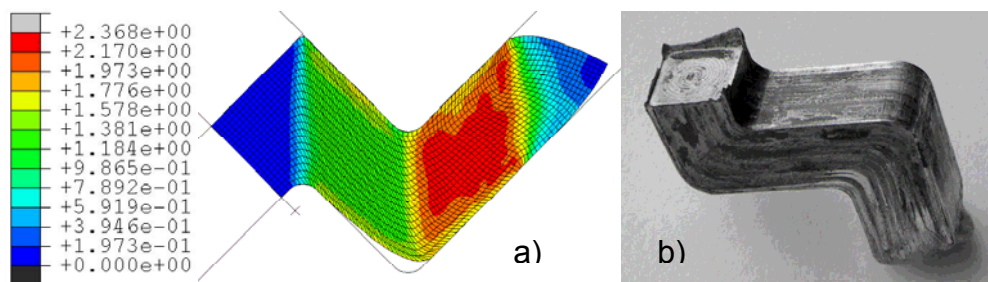
Při snaze zvýšit deformaci v průběhu jednoho průchodu byl navržen kanál ve tvaru S (Obr. 1.6 a). Toto uspořádání kanálů odpovídá průchodu „C“ u klasického nástroje. Pro zdvojnásobení deformace a efektivity ECAPu je na Obr. 1.6 b kanál ve tvaru U. Za účelem získání lepší homogenity mikrostruktury rovnoosých zrn rozdělených vysokými úhly hranic byla navržena varianta Bc. Dva záhyby s úhlem 90° Obr. 1.6 c. Na obrázku 1.6 d je kanál se třemi záhyby [4]. Rozložení ekvivalentní deformace v průběhu prvního průchodu nástrojem ECAP se dvěma záhyby je na obrázku 1.8 [14]. Toto zpracování odpovídá průchodu typu „C“ u klasického kanálu ECAP



Obr. 1.6 Schéma ECAP s „multipass“ kanálem [4].

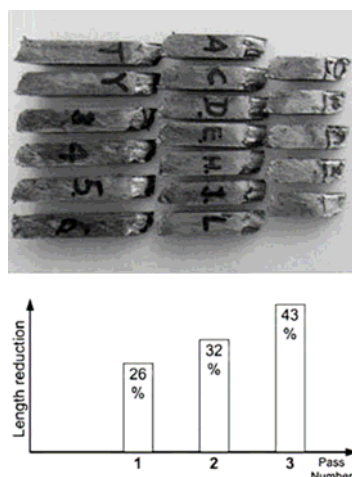


Obr. 1.7 Konstrukce nástroje se třemi záhyby [5].

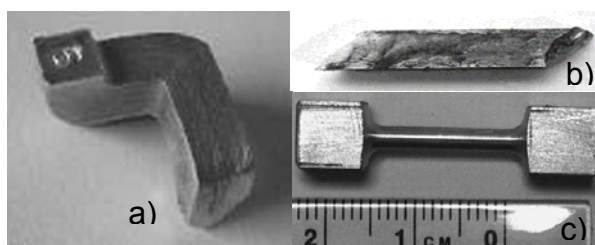


Obr. 1.8 a) Rozložení ekvivalentní deformace při prvním průchodu (model FEM),
b) částečně protlačený vzorek [14].

Konstrukce takového nástroje je složitá, vzhledem k jeho geometrii, Obr. 1.7. Při výrobě byly použity předpjaté segmenty. Nevýhodou tohoto kanálu je zkracování vzorků po každém průchodu, Obr. 1.9 [5]. Na následujícím snímku (Obr. 1.10) jsou vzorky ve třech fázích zpracování.



Obr. 1.9 Nežádoucí zkracování vzorků [5]



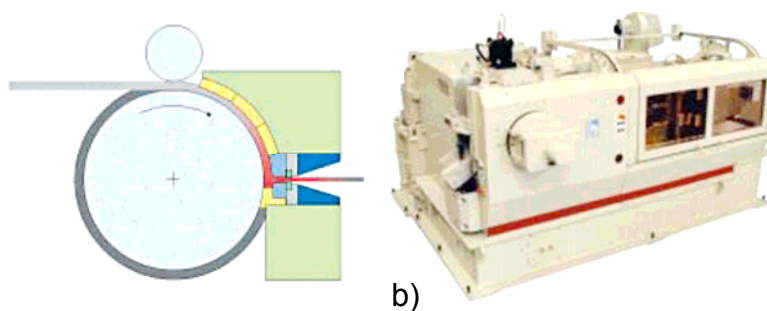
Obr. 1.10 Ukázky vzorků: a) v průběhu protlačování, b) po jednom průchodu, c) vzorek připravený na vyhodnocení mechanických vlastností [5].

Metoda ECAP je proces vhodný zejména pro tváření kovů, založený na operacích, které se mnohokrát opakují, dokud není dosaženo celkové hodnoty deformace potřebné pro žádané zjemnění zrna.

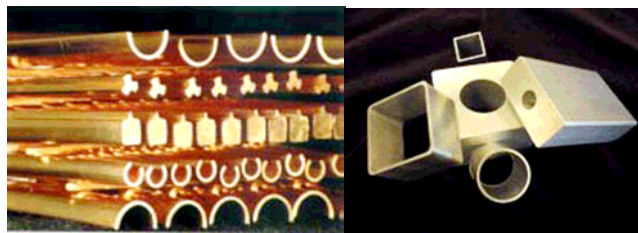
Původní provedení metody ECAP má určitá omezení. Poměrně krátkou délku zpracovávaného kusu a z toho plynoucí diskontinuita procesu s nízkou účinností a vysokými náklady, konce vytlačeného vzorku obvykle obsahují nerovnoměrnou strukturu a mikrotrhliny, a proto musí být část výtlačku oddělena [4]. Tato metoda je stále ve vývoji. Vyzkoušel se zpětný tlak na tvářený vzorek, což významně zvýšilo produktivitu procesu. Vyvinul se rotační nástroj, při jejímž použití není nutné vyjímat a opět zasouvat vzorek do nástroje mezi průchody a objevily se i nadějně modifikace ECAP pro plynulou výrobu [4].

1.2.3 Technologie ECAP – Conform

Tato technologie, vyvinutá v Rusku, je spojením dvou procesů: ECAP a Conform. Technologie protlačování hliníkových profilů Holton-Conform byla vyvinuta britskou společností Holton Machinery Ltd. Schéma metody a výrobní zařízení Holton-Conform 2000 je na obr. č. 1.11. Vzorek je dopraven do profilované drážky protlačovacího kola přitlačného válce a je uzavřen v drážce manžetou (na obr. žlutá část), která obsahuje topná tělesa. Aby se vzorek nenamotával na protlačovací kolo, je na kole umístěna zarážka. Otáčením kola vznikají vysoké tlaky a ohřátý vzorek je protlačován průvlakem. Výrobek můžou mít různé tvary: trubky, tyče, komplexní profily, Obr. 1.12. [4].



Obr. č. 1.11 a) Schéma technologie Holton-Conform, b) výrobní zařízení Holton Conform 2000 [4].

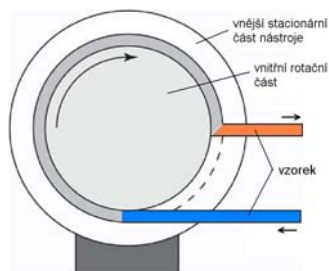


Obr. 1.12 Různorodé tvary vyrobených profilů z mědi a hliníkových slitin.

Proces Conform byl vyvinut již před třiceti lety, pro kontinuální protahování drátů [7]. Teprve nedávno byla tato metoda použita v kombinaci s nástrojem ECAP. Vznikl nový proces, nazvaný ECAP – Conform [4].

Autoři této metody ECAP – Conform spojili obě technologie tak, že protlačovací kolo uzavřeli do zápustky, která má výstup jako ECAP. V pevné části je vytvořena drážka, do které se zavádí tvářený materiál. Ten je posunován dopředu třecími silami, které vznikají na třech kontaktních plochách drážky. Tyto síly mají za úkol protlačit celkovou délku vzorku nástrojem ECAP. Princip je podobný, jako u původní metody Conform [4]. Avšak nový systém ECAP – Conform je navržen tak, aby mohl být vzorek opakovaně zpracován. Materiál vystupuje ze zápustky pod úhlem přibližně 90°, tak jako u „klasického“ ECAP. Proces je plynulý. Tímto způsobem je možno dosáhnout UFG struktury [4].

Dosavadní výsledky ukazují, že při technologii dochází ke zjemňování zrn a k zlepšení mechanických vlastností tak, jako u „klasického“ ECAP. Způsob je určen pro plynulé vytváření ultra jemnozrnných materiálů ve tvaru tyčí a pásů plechů. Při pokusech na obchodně čistém hliníku byl jako vzorek použit hliníkový drát o průměru 3,4 mm a délce přes 1 m, který byl zpracován čtyřmi průchody cestou C. Počáteční velikost zrna byla 5–7 μm . Bylo dosaženo výsledků dosahovaných při standardním způsobu ECAP, tj. značného zvýšení pevnostních vlastností a tažnosti.



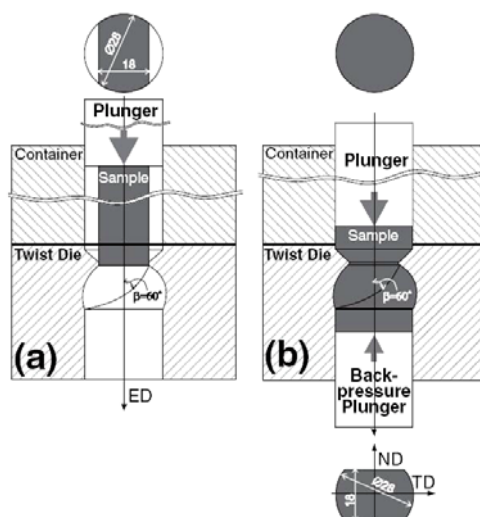
Obr. 1.13 Schematické znázornění procesu ECAP – Conform.

Na Obr. 1.13 je vyobrazeno schéma navrženého a zkonstruovaného systému ECAP – Conform [4]. Celý tento mechanismus se skládá z pevné a rotační části. V pevné části nástroje je vyhotoven kanál, sloužící k vedení vzorku. Rotační část uvádí vzorek do pohybu, pomocí třených sil. Vzorek se pohybuje v kanálu spolu s rotační částí nástroje. Výstupní část nástroje svírá s koncovou částí kanálu obvykle 90° - 105° . Tyto úhly jsou u experimentů nejběžněji používány. Na rozhraní obou kanálů dochází k vytvoření šikmých střižných rovin, jako u původního procesu ECAP.

Celý popsaný mechanismus vytváří z původního nástroje ECAP, nový kontinuální proces. Kromě úhlu mezi kanály, lze také měnit další parametry, například rychlost deformace. Ecap – Conform se využívá pro zpracování drátů [4].

1.2.4 TE - Twist extrusion

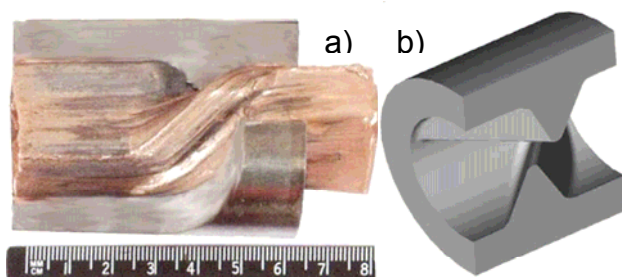
Schéma metody protlačování kanálem ve tvaru šroubovice (TE – Twist Extrusion) spolu se snímkem vzorku je uvedeno na obrázku 1.14 a 1.15. Experimenty byly provedeny se slitinami hliníku a s mědí.



Obr. 1.14 Schéma TE pro slitiny hliníku: a) vstupní kanál, b) výstupní kanál s protitlakem pro vytvoření požadovaného přetvoření materiálu [13].

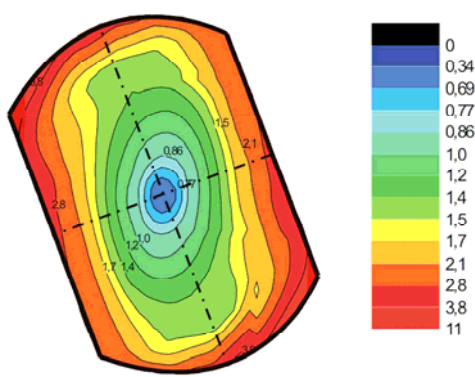
Princip metody spočívá ve vytvoření intenzivní střižové deformace protlačováním vzorků pravoúhlého průřezu nástrojem s kanálem ve tvaru šroubovice.

Tvar a průřez kanálu se podél osy protlačování nemění, zatím co kanál je podle této osy zkroucen. Rovněž tvar a průřez vzorku se před a po deformaci nemění, což dovoluje opakované protlačování a tudíž akumulaci plastické deformace [4].



Obr. 1.15 a) Snímek vzorku měděného vzorku v průběhu protlačování TE, b) model nástroje TE [12].

Existuje několik možností aplikace tlaku na protlačovaný vzorek. Jeden z nich je pomocí pístu. Střihová deformace není při zkroucování vzorku rozložena po jeho průřezu rovnoměrně. Větší část deformace je při průchodu zápusťou soustředěna na vstupu a výstupu ze zkroucené části nástroje [4]. Nejmenší deformace je v ose tvářeného vzorku a největší pak na okrajích vzorku, jak je zřejmé z obrázku 1.16.



Obr. 1.16 Rozdělení ekvivalentní deformace uvnitř příčného řezu vzorku po jednom průchodu TE [12]

Průměrnou velikost deformace ϵ je možné vypočítat podle vztahu (16) [4]:

$$\epsilon_{VM \text{ str.}} = (\text{tg}\beta_{\max} + (0,4 + 0,1 \cdot \text{tg}\beta_{\max})) / 2 \quad (16)$$

Protlačování s krutem bylo použito pro zpracování různých materiálů:

- Al-3% Mg-Sc-Zr slitiny – tváření proběhlo při cca 300 °C s protitlakem. Bylo použito 5 průchodů ($\epsilon_{VM} = 5,8$) s úhlem $\beta = 60^\circ$ [4].
- Bezokyslíkatý vysoce čistý měděný prášek o rozměru částic cca 200 μm . Velikost zrn v částicích byla 60–80 nm. Prášek byl nejprve stlačen v měděném kontejneru na hustotu cca 70 % a poté protlačován při 200 °C s protitlakem na průměr 12 mm [4].
- Amorfni páska ze slitiny Al₈₆Ni₆Co₂Gd₆ vyrobená rychlým ochlazením. Páska byla vložena do měděné nádoby a stlačena na hustotu 73 %. Po použití metody TE (podmínky tváření byly stejné jako u Al slitin) bylo dosaženo při teplotě 300 °C téměř 100 % hustoty [4].

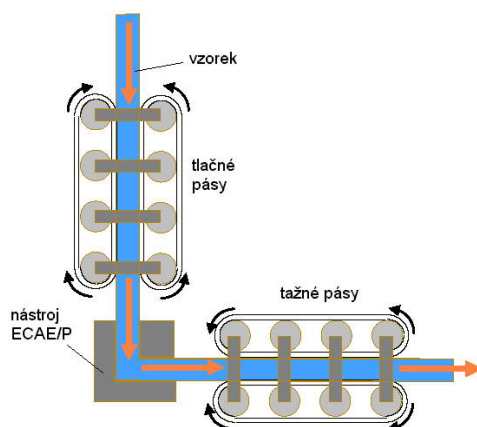
Technologie se stále vyvíjí. Experimenty se provádí pro různé železné i neželezné kovy a jejich slitiny. Vědci se také snaží o kombinaci technologie twist extrusion s jinými metodami.

1.2.5 Technologie CSPD ECAE/P

Jedná se o technologii ECAE/P, u níž se využívá kombinace protlačovacích a protahovacích operací. Ty se po vzájemném propojení dají využít ke kontinuální vícenásobné plastické deformaci materiálu. V tomto případě může být délka vstupní části nástroje menší, a tím bude na vstupu docházet i k menšímu tření. Tření je negativní doprovodný jev, který je vyvíjen mezi materiálem a nástrojem [1].

Celé zařízení se skládá ze dvou modulů, přičemž první modul zasouvá vzorek do vertikální části kanálu a druhý modul protahuje vzorek horizontální části kanálu. Tažné zařízení musí přetvořený materiál bezpečně a nepřetržitě odebírat z nástroje. Tento „push-pull“ mechanismus, sloužící k realizaci velké kontinuální plastické

deformace, je jednoduše znázorněn na Obr. 1.17. Takto zkonstruovaná zařízení mohou být řazena za sebou, k dosažení vyššího stupně deformace [1].



Obr. 1.17 Schéma „push-pull“ CSPD ECAE/P mechanismu [1].

Kontinuální „push-pull“ zařízení musí být schopné poskytovat dostatečnou sílu k protlačení materiálu. Tato síla je vyvinuta pomocí tření mezi mechanismem a vzorkem. Důležitá je proto velikost plochy styku mezi nimi. Jako „push-pull“ zařízení mohou být použity kladky, v kombinaci s pásy [1].

Takto upravený a v praxi testovaný proces ECAE/P, je schopen vyvinout velkou kontinuální plastickou deformaci, na vzorcích mnohem větších délek než doposud.

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

2.1 VÝBĚR MATERIÁLŮ

Při výběru materiálů byly zvoleny dva typy hliníkových slitin, a to: **AlMn1Cu**, **AlFe1,5Mn** dodaných ve formě litých a mírně proválcovaných pásů o tloušťce cca. 9 mm a 12 mm. Tyto materiály dodala firma AL INVEST Břidličná. Tyto slitiny mají v praxi široké portfolio užití. Dodávány jsou zejména ve formě litých plechů a válcovaných pásů. Vzhledem k dobré korozní odolnosti jsou tyto slitiny obvykle používány jednak v potravinářském průmyslu, ale zejména jako vstupní pásový materiál pro výrobu různých produktů pro venkovní užití s nižšími požadavky na mechanické vlastnosti.

Slitiny byly rovněž zvoleny také z důvodu jejich omezené možnosti tepelného zpracování pro zvýšení mechanických hodnot – a právě použití některé z technologií SPD může být vhodnou cestou k dosažení vyšších mechanických hodnot.

Odlité vzorky se vyrábí v tloušťce 8,5 mm s mírnou redukcí průchodem válců (asi 10%). Po odlití se mez kluzu u obou materiálů pohybuje v rozmezí 120 až 140 MPa, ovšem AlMn1Cu má vyšší hodnoty, vzhledem k vyššímu obsahu Mn. Po prvním úběru cca 40% je mez kluzu 180 až 200 MPa. Po celkové 90% redukci je mez kluzu 280 až 320 MPa.

Slitiny s obsahem Mn mají sklon k hrubnutí zrna při rekrystalizačním žíhání a to i přesto, že se dává předslitinou AlTi5B1. Teploty rekrystalizačního žíhání se odvíjí od celkové redukce válcování za studena. Záleží také na tom, zda tomuto žíhání předcházelo nějaké jiné. Obecně lze říct, že se dostatečná teplota pro úplnou rekrystalizaci pohybuje v rozmezí 420 až 450 °C. Doba výdrže je minimálně 4 hodiny. V průmyslových podmínkách se používá řízené chlazení v ochranné atmosféře, a to 50°C / hodinu.

Předslitina AlTi5B1 se do taveniny Al přidává proto, aby bylo v ní bylo dostatečné množství krystalizačních zárodků pro jemnozrnnou litou strukturu. Dávkování je u těchto dvou slitin 3 kg předslitiny na tunu odlitého materiálu.

Mez kluzu 180 – 200 MPa jsou pro materiál válcovaný za studena celkovou redukcí 40 – 50 %. Následným žíháním při teplotě 370 °C dosáhneme hodnoty **meze kluzu 140 – 160 MPa**. V tabulkách 2.1 a 2.2 je uvedeno chemické složení obou slitin.

Tabulka 2.1 Chemické složení slitiny AlMn1Cu.

Prvek	Al	Cu	Fe	Mn	Si	Zn
[hm.%]	97,05 – 98,95	0,05 – 0,2	<=0,7	1 – 1,2	<=0,6	<=0,1

Tabulka 2.2 Chemické složení slitiny AlFe1,5Mn.

Prvek	Al	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Zn
[hm.%]	95,9 – 98,5	<=0,3	1,2 – 2	<=0,1	0,3 – 1	<=0,4	<=0,1

Vzorky pro protlačování byly vyhotoveny u obou slitin v těchto rozměrech: průřez 9,95 x 9,95 mm a délka 43 mm. Na obrázku 2.1 je vzorek připravený k protlačení.



Obr. 2.1 Výchozí vzorek před protlačením.

2.2 VÝBĚR MAZIVA

Druh maziva byl vybrán na základě konzultací s firmami, zabývajícími se touto problematikou. Vybrané mazivo je výrobkem firmy Wessely Ges. m. b. h. z Korneuburgu, z Rakouska. Jedná se o mazivo Gleit – μ HP 515, určené pro tváření za studena, kde již nestačí obvyklá maziva.

Gleit – μ HP 515 je homogenní, dobře roztíratelná, světle zbarvená pasta s vysokým podílem synergeticky působících bílých tuhých maziv. Je postavena na bázi speciálních minerálních olejů. Vyniká extrémní odolností vůči tlakům a má vysoký oddělovací účinek. Technické údaje maziva jsou uvedeny v tabulce 2.2.

Tabulka 2.2 Technické údaje maziva.

Vlastnosti	Zkušební metoda	Hodnota / Stav	Jednotka
Barva	vizuálně	bílá/krémová	
Základový olej		minerální olej	
Hustota	DIN 51757	cca 1,3	[g/cm ³]
Penetrace	DIN 51804, list 1	265 – 315	[mm/10]
Teplotní okruh použití		-25 až +100	[°C]
Odolnost vůči vodě	DIN 51807, T1	1 – 90	

2.3 LIS DP 1600 kN

Veškeré zkoušky, s vybranými slitinami, byly prováděny na VŠB – TU Ostrava, na hydraulickém lisu DP 1600 kN, Obr. 2.2 a Obr 2.3. Základní technické informace lisu jsou popsány v tabulce 2.3.



Obr. 2.2 Lis DP 1600 kN.



Obr. 2.3 Detailní pohled na řídicí panel.

Tabulka 2.3 Technické parametry tvářecího zařízení.

Technické parametry	Hodnota	Jednotka
Jmenovitá tvářecí síla	1600	kN
Rychlost posuvu	0 - 40	mm / min
Zdvih	120	mm
Rozměry lisu	800 x 1700 x 1850	mm

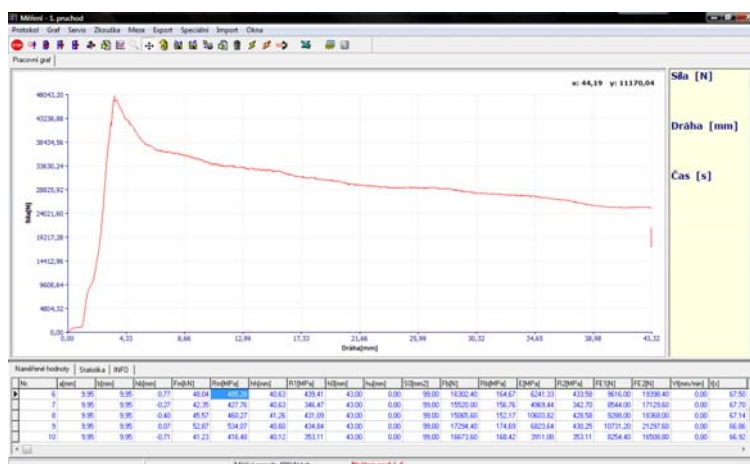
V roce 2007 byl lis modernizován. Nyní ho pohání zcela nová hydraulická jednotka. Je opatřen elektronickým řídicím panelem. Veškeré úkony lze zadávat ručně na tomto panelu. Častěji je však využívána komunikace a řízení prostřednictvím PC, obr. 2.3.



Obr. 2.3 Řízení lisu prostřednictvím počítače.

K nové řídicí jednotce byl dodán software M-test, jehož prostřednictvím je možné on-line sledovat a ukládat veškeré hodnoty během zkoušky. Je schopen zaznamenat například velikost síly, kterou umí přepočítat na deformační odpor, rychlost posuvu, dráhu, čas a další veličiny. V průběhu zkoušky program zobrazuje tyto veličiny v podobě grafů, obr. 2.4.

Veškeré naměřené hodnoty se ukládají a lze je exportovat v podobě textového souboru například do Excelu, kde si uživatel může zobrazit jakoukoli možnou závislost mezi veličinami.

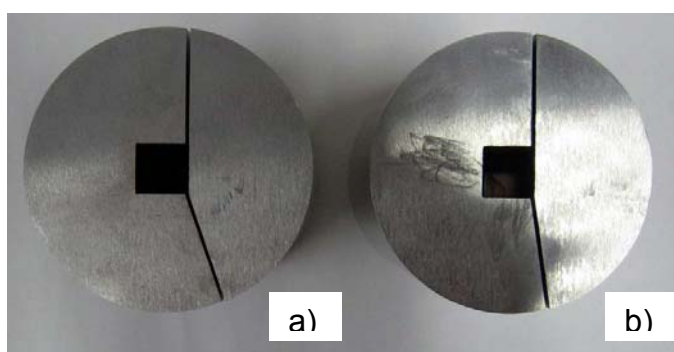


Obr. 2.4 Prostředí programu M-test.

2.4 NÁSTROJ ECAP

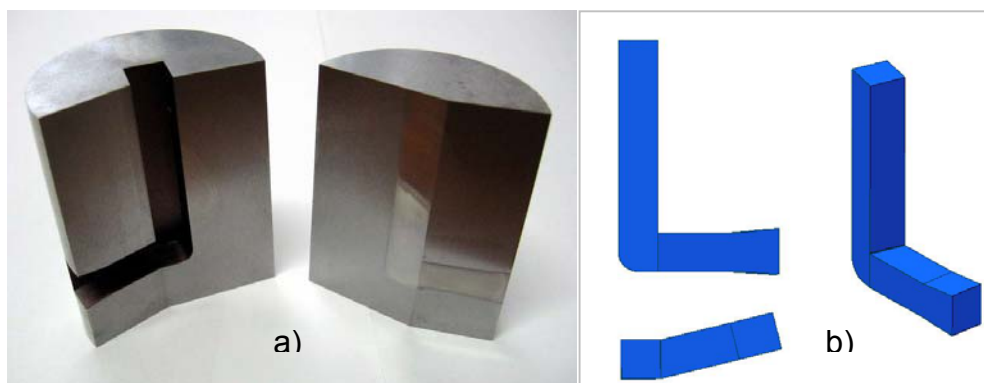
Na základě rozsáhlé studie simulace deformačního chování materiálů během tvářecího procesu ECAP byly navrženy změny geometrie protlačovacího kanálku vedoucí k jeho zefektivnění

Experimenty byly provedeny na třech různých nástrojích ECAP. Liší se velikostí vychýlení horizontálního kanálu. První nástroj je klasický bez vychýlení, druhý má horizontální kanál vychýlen o 10° (obr. 2.5 a) a třetí o 20° (obr. 2.5 b).

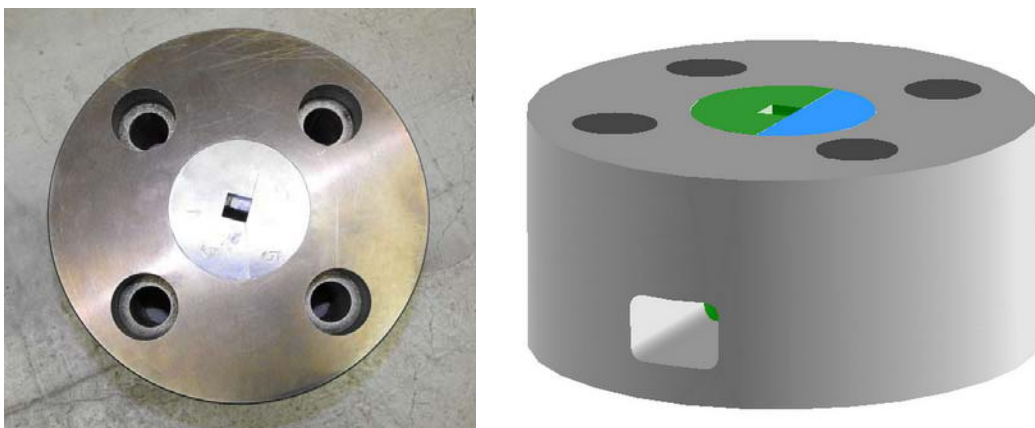


Obr. 2.5 Nástroj s vychýlením horizontálního kanálu: a) 20° , b) 120° .

Samotný nástroj se skládá ze dvou částí. V jedné z těchto částí je vytvořen kanál s průřezem 10×10 mm, obr 2.6. Obě části každého nástroje byly nalisovány do bandáže, obr. 2.7.

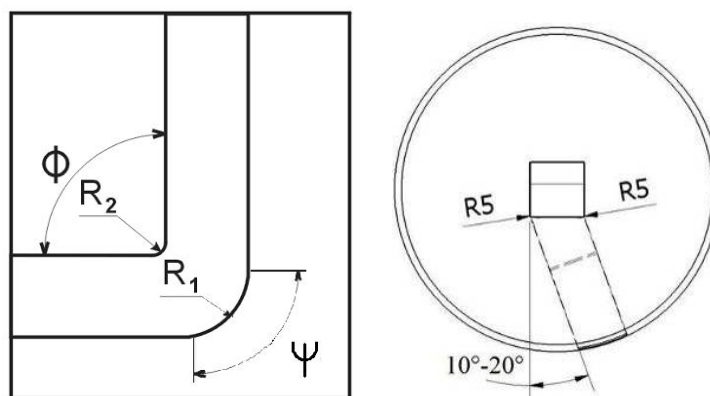


Obr 2.6 a) Pravoúhlý kanál v nástroji s průřezem 10×10 mm, b) model kanálu.



Obr 2.7 a) Nástroj nalisovaný v bandáž, b) model nalisovaného nástroje v bandáži.

Geometrie nástroje je rozhodující faktor pro konečné vlastnosti protlačeného materiálu, jak na jeho strukturu, tak i na zpevnění, obr.2.8. Jednotlivé hodnoty jsou uvedeny v tabulce 2.4.



Obr. 2.8 Geometrie nástroje.

Tabulka 2.4 Geometrické parametry.

Parametry	Hodnota
Úhel Φ	90°
Úhel Ψ	90°
Zaoblení R_1	4 mm
Zaoblení R_2	0,5 mm
Průřez kanálu	10 x 10 mm
Vychýlení	0° - 20°

K protlačování slitin byl použit speciální průtlačník. Byl navržen tak, aby odolal namáhání na vzpěr. Průřez průtlačníku byl pro eliminaci třecích sil v kanále zmenšen, kromě jeho spodní kontaktní části, obr. 2.9.



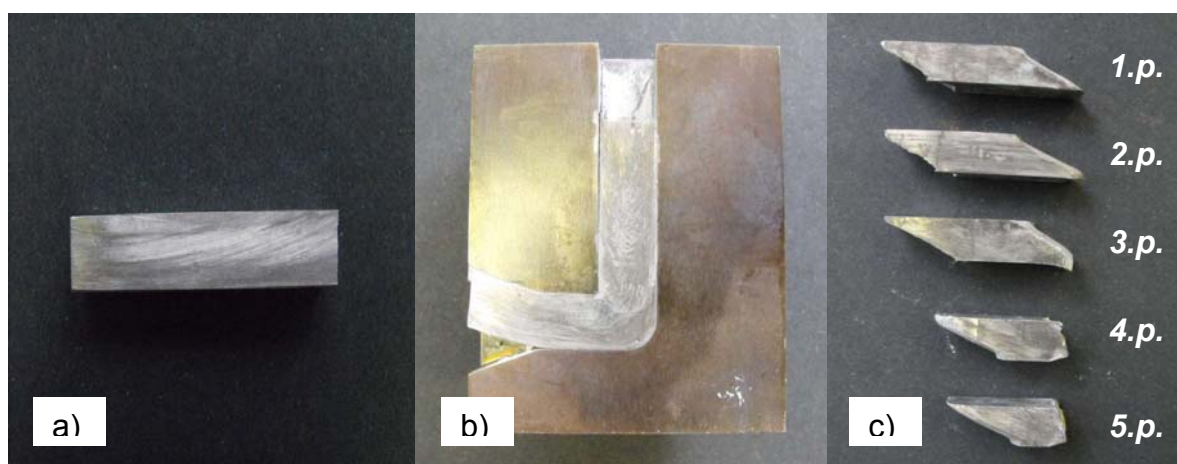
Obr. 2.9 Průtlačník.

2.5 PROTlačOVÁNÍ SLITIN AlMn1Cu A AlFe1,5Mn

Vzorky obou slitin byly protlačeny na 5 průchodů u všech tří typů nástrojů. Po každém protlačení byly vždy dva vzorky ponechány k vyhodnocení mechanických a tvářecích vlastností. U každého protlačeného vzorku byla graficky zaznamenána závislost přetvárného odporu na změně dráhy.

Tvářecí podmínky při protlačování ECAP:

- Teplota: 20°C, za studena
- Geometrie: $\phi = 90^\circ$, $\psi = 90^\circ$, $R_1 = 4 \text{ mm}$, $R_2 = 0,5 \text{ mm}$.
- Vychýlení: 0°, 10°, 20°
- Typ průchodu: B_C (vzorky byly po jednotlivých protlačeních pootočeny kolem podélné osy o 90 °).
- Počet průchodů: 5 průchodů
- Mazivo: Gleit – μ HP 515



Obr 2.9 a) Výchozí vzorek, b) vzorek v průběhu protlačování (výstupní část vzorku je vyhnutá z důvodu vylisování nástroje z bandáže), c) vzorky po jednotlivých etapách protlačování.

Cesta B_C byla použita pro zvýšení koncentrace deformace v objemu vzorku. Výchozí tvar vzorku a tvary vzorků po jednotlivých etapách stlačení jsou uvedeny na Obr. 2.9. Z obrázku 2.9 c) je rovněž zřejmé nežádoucí zkracování vzorků po jednotlivých průchodech.

3 ANALÝZA DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Podstatou diplomové práce bylo provedení experimentů se slitinami AlMn1Cu a AlFe1,5Mn na nových nástrojích ECAP. Dále byla provedena analýza vlivů počtu průchodů a vliv změny vychýlení horizontálního kanálu na dosaženou velikost přetvárného odporu.

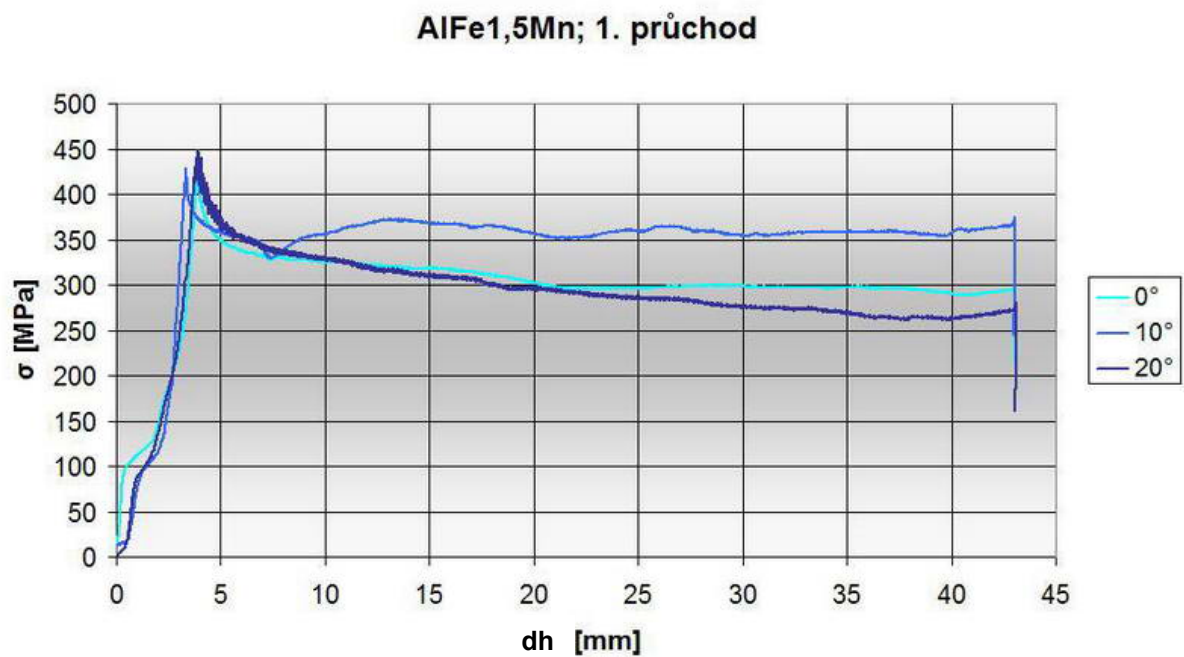
V průběhu experimentů byla zaznamenávána data, která byla dále zpracována. Všechny naměřené hodnoty, závislosti síly F na změně dráhy dh , byly převedeny na grafickou závislost přetvárného odporu σ_p na změnu dráhy dh . Studium změny přetvárného odporu na dráze, z hlediska zefektivnění průběhu tvářecího procesu jako takového, bylo hlavním úkolem diplomové práce.

3.1 VLIV POČTU PRŮCHODŮ NA ZPEVNĚNÍ MATERIÁLU

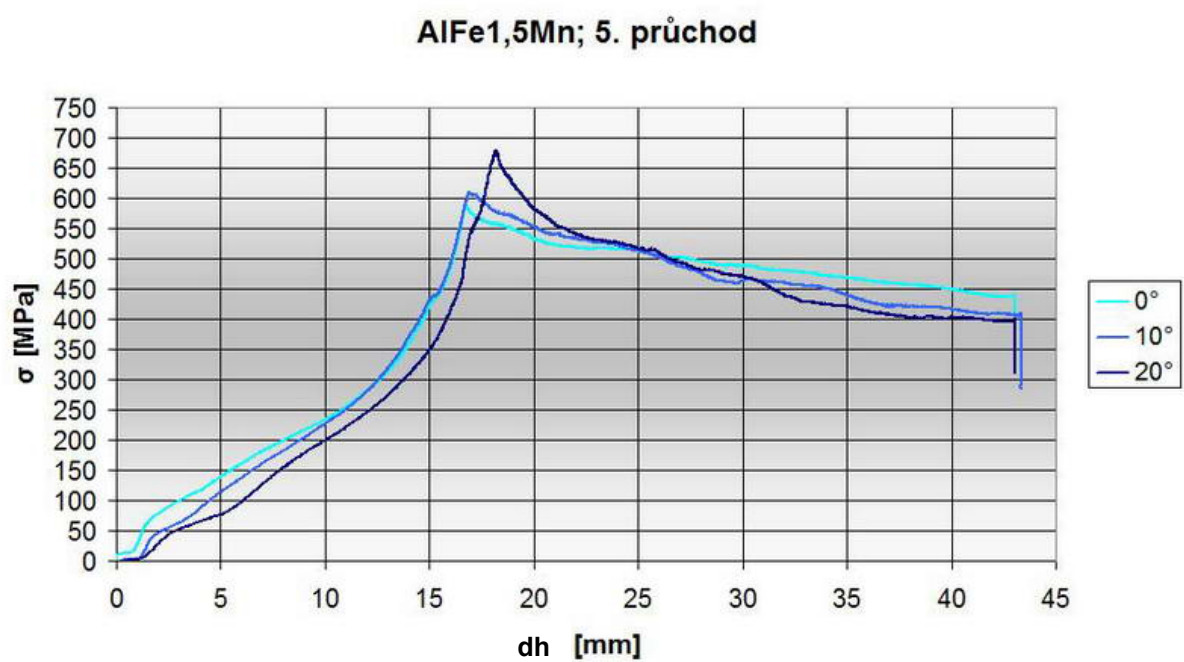
3.1.1 Slitina AlFe1,5Mn

U slitiny AlFe1,5Mn docházelo ke zpevňování od prvního až po čtvrtý průchod. U pátého průchodu byly maximální hodnoty přetvárného odporu u geometrie 0° , 10° i 20° nižší než u čtvrtého průchodu. Z hlediska zpevňování materiálu se u této slitiny pátý průchod jeví jako neefektivní.

Na následujících obrázcích (3.1 a 3.5) jsou znázorněny průběhy deformačního odporu pro první a pátý průchod slitiny AlFe1,5Mn. V grafu jsou vždy tři křivky vyjadřující odlišnou geometrii použitých nástrojů. Druhý až čtvrtý průchod viz. přílohy č. 1 – 3.



Obr. 3.1 První průchod slitiny AlFe1,5Mn.



Obr. 3.5 Pátý průchod slitiny AlFe1,5Mn.

Maximální dosažené hodnoty přetvárných odporů σ_{pmax} jsou uvedeny v tabulce 3.1. Ve čtvrtém průchodu byly dosaženy maximální hodnoty σ_{pmax} , tudíž i největšího zpevnění materiálu.

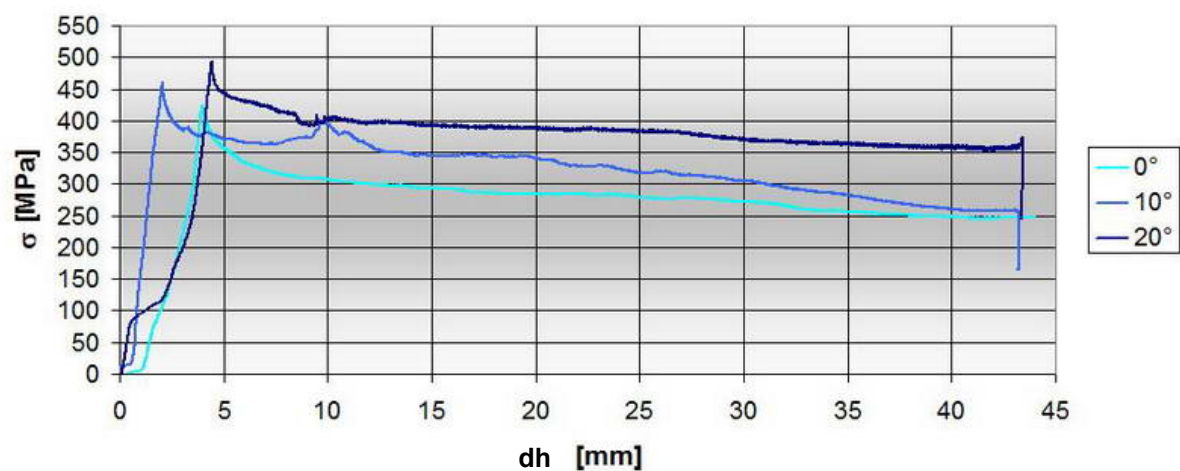
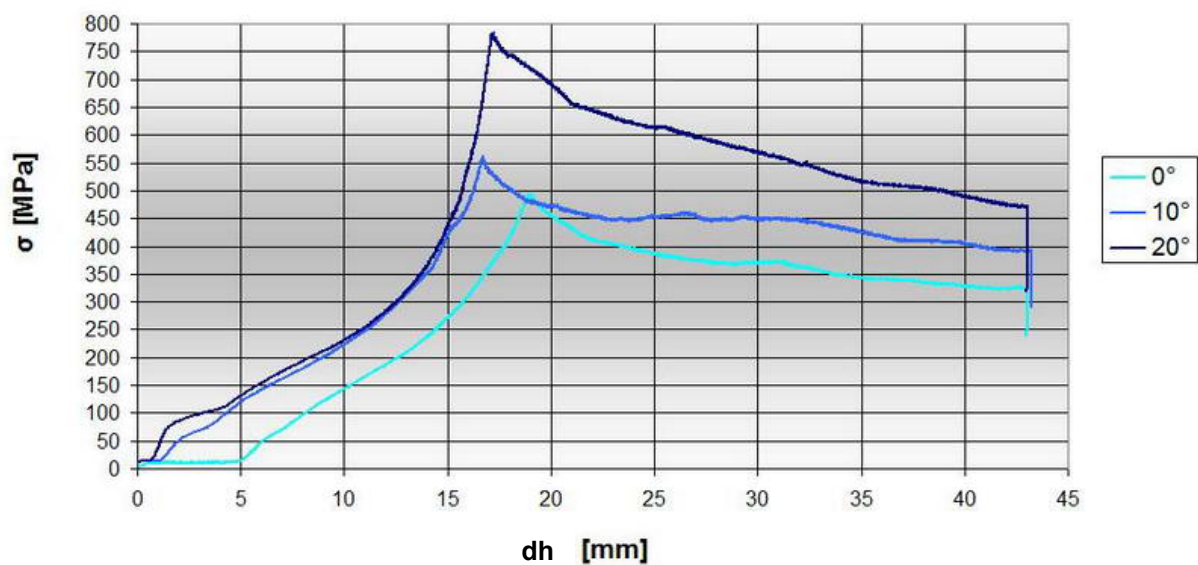
Tab. 3.1 Naměřené maximální hodnoty přetvárných odporů σ_{pmax} u slitiny AlFe1,5Mn.

Počet průchodů	Přetvárný odpor σ_{pmax} [MPa]		
	0°	10°	20°
1	423,3	429,1	449,3
2	529,1	534,2	547,9
3	582,3	605,6	642,0
4	596,4	617,3	718,6
5	592,2	610,8	678,7

3.1.2 Slitina AlMn1Cu

Oproti výše uvedené slitině docházelo ke zpevňování i v pátém průchodu, kde byly naměřeny hodnoty dosahující téměř 800 MPa. Zde se i pátý průchod jeví jako efektivní z hlediska zpevnění materiálu.

Také u této slitiny jsou na následujících obrázcích (3.6 a 3.10) znázorněny průběhy deformačního odporu opět pro první a pátý průchod (2. až 4. průchod, viz. přílohy č. 4 – 6). V grafech jsou opět tři křivky vyjadřující odlišnou geometrii nástrojů. Maximální dosažené hodnoty přetvárných odporů jsou uvedeny v tabulce 3.2.

AlMn1Cu; 1. průchod*Obr. 3.6 První průchod slitiny AlMn1Cu.***AlMn1Cu; 5. průchod***Obr. 3.10 Pátý průchod slitiny AlMn1Cu.*

Maximální dosažené hodnoty přetvárných odporů σ_{pmax} jsou uvedeny v tabulce 3.2. Oproti slitině AlFe1,5Mn zde byly dosaženy maximální hodnoty v pátém průchodu σ_{pmax} , tudíž i největšího zpevnění materiálu.

Tab. 3.2 Naměřené maximální hodnoty přetvárných odporů σ_{pmax} u slitiny AlMn1Cu.

Počet průchodů	Přetvárný odpor σ_{pmax} [MPa]		
	0°	10°	20°
1	425,4	460,7	494,9
2	447,2	476,6	563,8
3	445,3	481,8	638,2
4	452,6	542,1	768,7
5	494,8	562,5	782,1

3.1.3 Srovnání výsledků obou slitin

V následující tabulce 3.3 jsou srovnány hodnoty přetvárných odporů po prvním průchodu a po pátém průchodu u obou slitin. Ve výsledcích mezi oběma materiály docházelo k malým diferencím, které byly zkresleny v důsledku vyhodnocení různého počtu vzorku v jednotlivých průchodech a z toho plynoucí nižší počet výsledků, potřebných ke statistickému vyhodnocení. Avšak z hlediska vlivu počtu průchodů bylo jednoznačně prokázáno zpevňování obou materiálů.

Tab. 3.3 Srovnání hodnot přetvárných odporů σ_{pmax} u obou slitin po prvním a pátém průchodu.

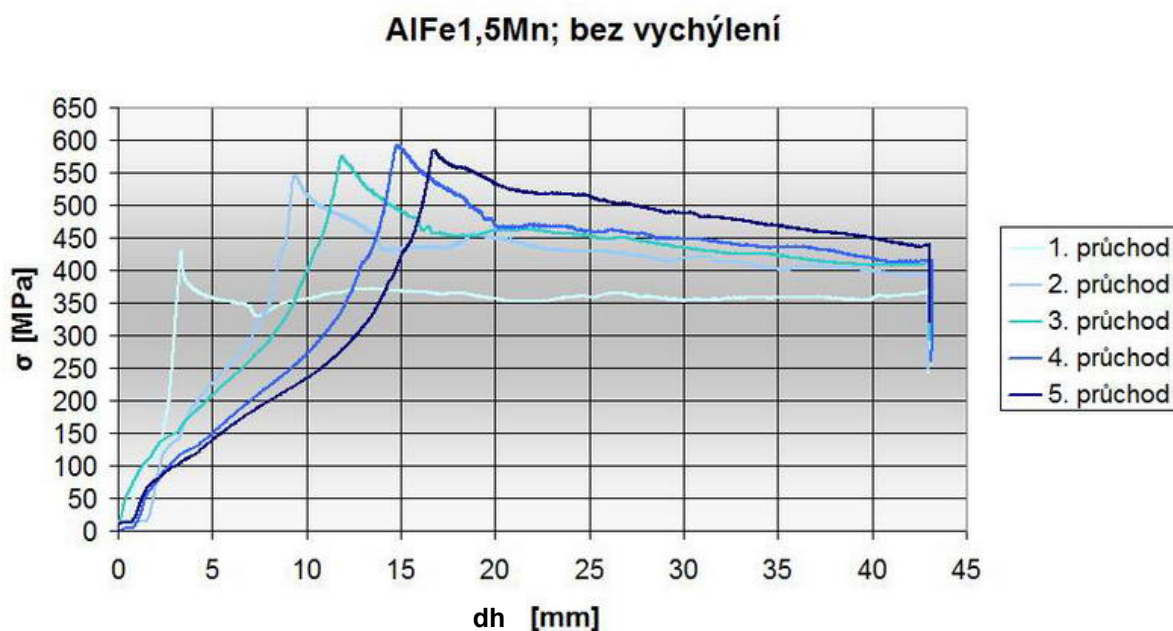
	Přetvárný odpor σ_{pmax} [MPa]		
	0°	10°	20°
AlFe1,5Mn, 1. průchod	423,3	429,1	449,3
AlMn1Cu, 1. průchod	425,4	460,7	494,9
AlFe1,5Mn, 4. průchod	592,2	610,8	678,7
AlMn1Cu, 5. průchod	494,8	562,5	782,1

3.2 VLIV ZMĚNY GEOMETRIE NA ZPEVNĚNÍ MATERIÁLU

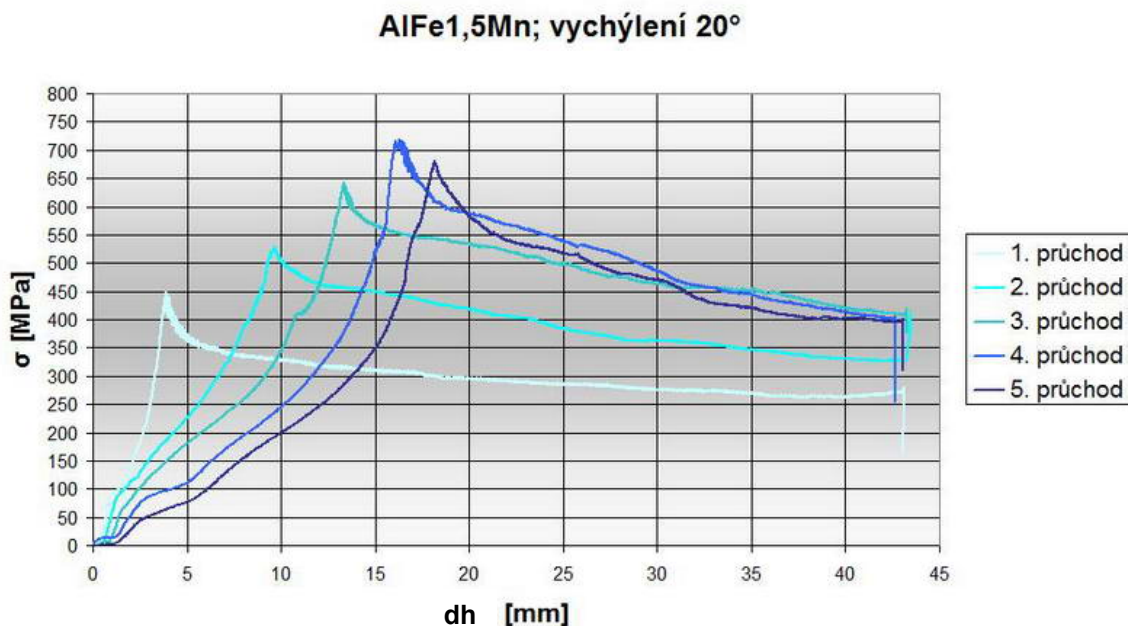
Zde se posuzoval vliv vychýlení výstupního kanálu na velikost zpevnění. Zkoušky byly provedeny na nástroji bez vychýlení (tzv. klasický kanál ECAP) a na nástrojích s vychýlením 10° a 20° horizontálního kanálu, vždy pro pět průchodů u obou slitin.

3.2.1 Slitina AlFe1,5Mn

U této slitiny docházelo k největšímu zpevnění při protlačování nástrojem s vychýlením horizontálního kanálu 20°. Na obrázcích 3.11 a 3.13 jsou uvedeny grafy pro pět průchodů nástrojem bez vychýlení a s vychýlením 20°. Průběh deformačního odporu u nástroje s vychýlením 10° viz. příloha č. 7.



Obr. 3.11 Slitina AlFe1,5Mn protlačena nástrojem bez vychýlení kanálu.



Obr. 3.13 Slitina AlFe1,5Mn protlačena nástrojem s vychýlením 20°.

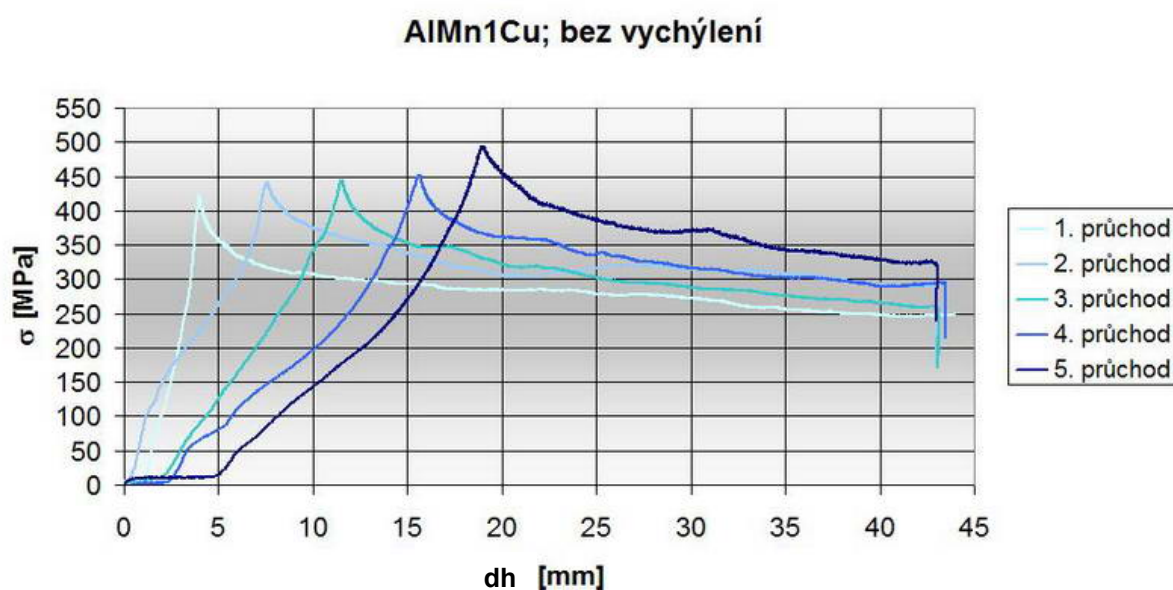
Maximální hodnoty přetvárných odporů σ_{pmax} jsou uvedeny v tabulce 3.4. Největší zpevnění bylo u této slitiny zjištěno u nástroje s vychýlením 20°.

Tab. 3.4 Naměřené maximální hodnoty přetvárných odporů σ_{pmax} u slitiny AlFe1,5Mn.

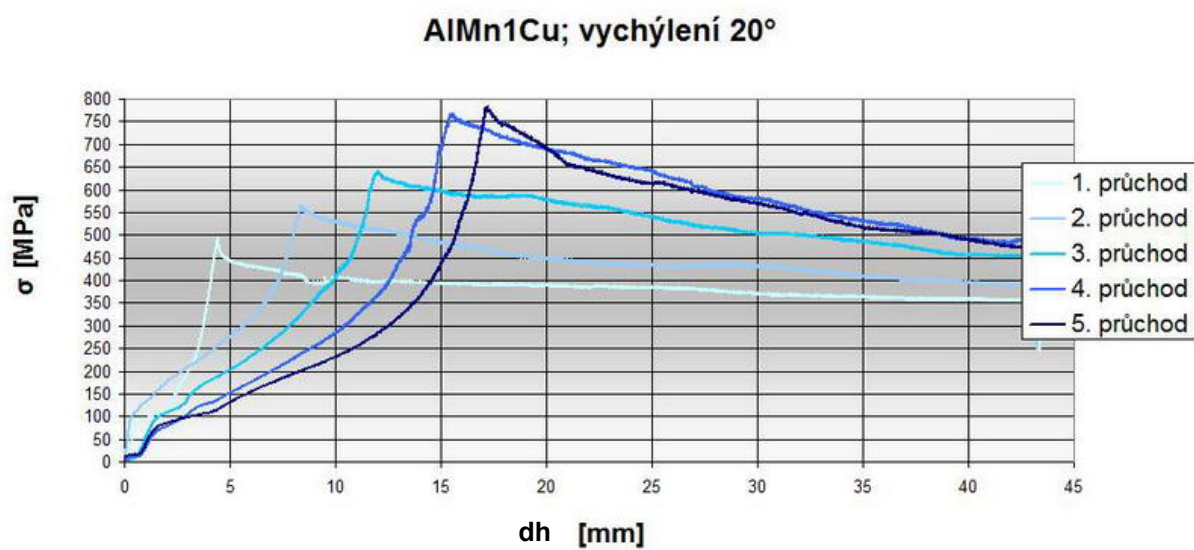
	Přetvárný odpor σ_{pmax} [MPa]				
	1	2	3	4	5
0°	426,2	533,2	576,4	591,8	584,3
10°	429,4	535,3	602,5	615,7	609,9
20°	449,8	547,5	642,6	718,1	677,4

3.2.2 Slitina AlMn1Cu

U slitiny AlMn1Cu dosahovaly přetvárné odpory nejvyšších hodnot u nástroje s vychýlením horizontálního kanálu 20°, v pátém průchodu. Závislost přetvárného odporu na změně dráhy jsou uvedeny na obrázcích 3.14 a 3.16 pro nástroje bez vychýlení a s vychýlením 20°. Graf pro průchod nástrojem s vychýlením výstupního kanálu 10° je v příloze č. 8.



Obr. 3.14 Slitina AlMn1Cu protlačena nástrojem bez vychýlení.



Obr. 3.16 Slitina AlMn1Cu protlačena nástrojem s vychýlením 20°.

Maximální hodnoty přetvárných odporů σ_{pmax} jsou uvedeny v tabulce 3.5.

Tab. 3.5 Naměřené maximální hodnoty přetvárných odporů σ_{pmax} u slitiny AlMn1Cu.

	Přetvárný odpor σ_{pmax} [MPa]				
	1	2	3	4	5
0°	429,2	441,4	445,8	452,6	494,5
10°	460,3	476,7	481,3	539,7	562,8
20°	494,4	561,7	640,8	764,5	783,1

3.2.3 Srovnání výsledků obou slitin

V tabulce 3.6 je uvedeno srovnání maximálních hodnot přetvárného odporu σ_{pmax} dosažených v prvním až pátém průchodu u nástroje bez vychýlení a s vychýlením horizontálního kanálu 20° u obou slitin. Rovněž i u těchto experimentů docházelo k diferencím mezi výsledky obou slitin.

Při těchto experimentech se vychýlení horizontálního kanálu projevilo pozitivně na zpevnění slitin. Nejefektivnější, z hlediska zpevnění materiálu, je nástroj s vychýlením horizontálního kanálu 20° ve čtvrtém a pátém průchodu.

Tab. 3.6 Srovnání maximálních hodnot přetvárných odporů σ_{pmax} u obou slitin, v závislosti na velikosti vychýlení kanálu.

	Přetvárný odpor σ_{pmax} [MPa]				
	1	2	3	4	5
AlFe1,5Mn, vychýlení 0°	426,2	533,2	576,4	591,8	584,3
AlMn1Cu, vychýlení 0°	429,2	441,4	445,8	452,6	494,5
AlFe1,5Mn, vychýlení 20°	449,8	547,5	642,6	718,1	677,4
AlMn1Cu, vychýlení 20°	494,4	561,7	640,8	764,5	783,1

3.3 VYHODNOCENÍ STRUKTURY

V oblasti metalografického hodnocení byla volena technologie TEM. Ve spolupráci s pobočkou Polské akademie věd v Krakově byla provedena série metalografického hodnocení.

3.3.1 Vyhodnocení struktury slitiny AlMn1Cu

U slitiny AlMn1Cu byl již po prvním průchodu potvrzen výskyt zrn o střední velikosti cca 1 μm až 2 μm a velké množství dislokací uvnitř zrn. V příloze č. 9 je snímek struktury TEM a model SAED po prvním průchodu. Struktura měla obdobné vlastnosti u protlačení nástrojem bez vychýlení i s vychýlením 10° a 20°.

U pátého protlačení klasickým nástrojem bez vychýlení vznikaly malá zrna s velkou dezorientací o střední velikosti 0,5 μm až 0,7 μm . Vznikalo zde mnoho intermetalických inkluzí v blízkosti malých zrn. Vlivem částečné rekrytalizace vznikaly malé defekty uvnitř zrn. Projevovala se zde heterogenita struktury. TEM snímek a model struktury viz. příloha č. 10.

Struktura slitiny po pátém průchodu u nástroje s vychýlením 20° vykazuje jemnozrnnou strukturu se střední velikosti zrn 0,2 μm až 0,6 μm a vysokou dezorientací mezi zrny. Vyskytuje se zde mnoho intermetalických inkluzí obsahující železo o velikosti až 5 μm (příloha č. 11).

3.3.2 Vyhodnocení struktury slitiny AlFe1,5Mn

Slitina AlFe1,5Mn vykazovala po prvním průchodu vyšší míru heterogenity střední velikosti zrn. Jsou zde vidět (příloha č. 12) malá i velká zrna v rozsahu 0,5 μm až 3 μm s nízkými úhly hranic zrn.

Po pátém průchodu byla střední velikosti zrna ve srovnání s předchozí slitinou příznivější – 0,3 μm až 0,4 μm . Byla však sledována nižší míra dezorientace mezi zrny a občasný výskyt zrn o velikosti 1 μm . Tento jev s největší pravděpodobností souvisí s dynamickou rekrytalizací v průběhu procesu. Pravděpodobný proces dynamické rekrytalizace byl ovšem v menší míře sledován i u slitiny AlMn1Cu [8]. Co se týče velikosti zrn a jejich dezorientace se výsledky struktury po pátém průchodu na nástroji s vychýlením 20° a bez vychýlení u této slitiny příliš nelišily.

V příloze č. 13 a 14 jsou uvedeny struktury AlFe1,5Mn po pátém průchodu bez vychýlení kanálu a kanálem s 20° vychýlením.

4 METODIKA VYHODNOCENÍ MECHANICKÝCH A TVÁŘECÍCH VLASTNOSTÍ U KRÁTKÝCH VZORKŮ

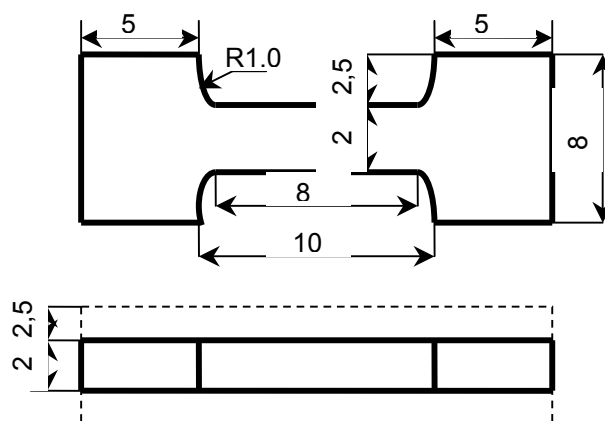
Hodnocení mechanických vlastností je v tomto případě značně omezené. Jedná se o limitovanou velikost materiálů vyrobených SPD technologií. Důležité je zajištění přijatelné „kompatibility“ s výsledky standardizovaných zkoušek.

V současné době se pro hodnocení mechanických vlastností UFG materiálů nejčastěji používá měření tvrdosti dle Vickerse pod nízkým napětím (1,96 až 9,81 N) a tahových zkoušek. Měření tvrdosti se vzhledem k jeho specifikaci jeví jako výhodné. Problematika vyhodnocování tahových zkoušek u malých vzorků je stále ve stádiu řešení, vzhledem k jejich nestandardizovaným podmínkám [15].

Byly vypracovány návrhy, které zajistí ověření kompatibility výsledků tahových zkoušek na malých vzorcích s výsledky prováděných na standardizovaných vzorcích dle EN 10002.

Na pracovišti mechanické laboratoře VÚHŽ a.s. Dobrá byly provedeny série tahových zkoušek na obou sledovaných slitinách ve výchozím stavu, a to jak s použitím standardizovaných zkušebních tyčí (plochý typ, ozn. B, $b_0 = 12,5$ mm, $l_c = 75$ mm [17]), tak i s použitím nestandardních typů zkušebních tyčí malých rozměrů. Byly vypracovány 4 návrhy malých zkušebních tyčí, ze kterých byl vybrán pouze jeden, který ve srovnání s výsledky obdržených s použitím standardních tyčí vykazoval minimální rozdíly [15].

Na obr. 4.1 je uveden návrh nestandardní zkušební tyče s malými rozměry, který byl zvolen po předchozích ověřovacích zkouškách [15].

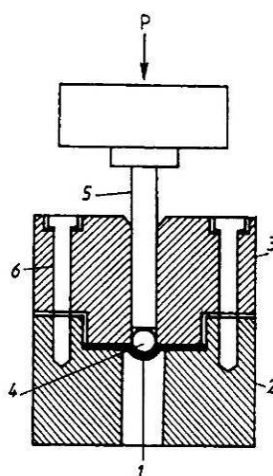


Obr. 4.1: Návrh zkušební tyče s malými rozměry

Obecně lze říct, že při shodných rychlostech zatěžování výsledky tahové zkoušky na vzorcích malých rozměrů vykazují dostatečnou shodu s výsledky tahové zkoušky na standardních tyčích [15].

Jako dalším stupněm řešení nového přístupu hodnocení mechanických vlastností UFG materiálů byl návrh nového – dosud pro tento typ materiálu nepoužitého – typu zkoušek na malých vzorcích.

Principiálně se jedná o jednoduchý test spočívající ve stanovení průběhu velikosti tlakového (penetračního) zatížení vs. hloubky penetrace malého vzorku a stanovení specifických bodů na této křivce. Schematické znázornění sestavy zařízení pro penetrační zkoušku je uvedeno na obr. 4.2 [15].



Obr. 4.2 Schematické znázornění penetrační zkoušky
1) vzorek, 2) spodní díl, 3) vrchní díl, 4) přítlačná kulička, 5) trn [15]

Výhodou této zkoušky je její jednoduchost (možnost jejího provádění na vhodných standardních tahových/tlakových zkušebních strojích), korelace mezi výsledky standardní tahové zkoušky (po zhotovení korelačních křivek), ale zejména minimální nároky na velikost vzorku [15].

V laboratoři mechanických vlastností VÚHŽ a.s. již byly úspěšné provedeny první penetrační zkoušky obou typů slitin, a to jak ve stavu výchozím, tak i ve stavu po provedené deformaci systémem ECAP. Na obr. 4.3 [16] je uveden adapter, pomocí kterého jsou prováděny penetrační zkoušky s použitím repasovaného tahového/ tlakového stroje TIRAtest 2300 [15].



Obr. 4.3: Adaptér pro penetrační zkoušky [15].

Uvedený adapter byl navrhován zejména s přihlédnutím k použití přednostních rozměrů vzorku 8 x 8 x 0,5 mm a 10 x 10 x 0,5 mm. Principiálně lze adapter upravit i pro jiné velikosti vzorků.

V současnosti jsou již známy výsledky penetračních zkoušek. Předpokládaný nárůst pevnosti se odpovídajícím způsobem projevil na nárůstu max. síly i síly při úplné penetraci vzorku, včetně odpovídajících změn průhybů vzorku na hodnotách odpovídajících sil. V následující tabulce 4.1 jsou uvedeny výsledky první série penetračních zkoušek [15].

Tabulka 4.1: Výsledky penetračních zkoušek [15]

Materiál	Vyosení kanálu	Průchody	F_{\max} [N]	d_{\max} [mm]	F_b [N]	d_f [mm]
AlMn1Cu	výchozí stav*	směr x	386	1,80	194	2,11
		směr y	386	1,50	194	1,83
	20°	1	425	1,63	213	2,17
		4	445	1,59	222	1,99
		5	487	1,56	244	1,99
	10°	1	344	1,61	173	2,08
		4	381	1,50	191	1,93
		5	531	1,35	266	1,82
AlFe1,5Mn	výchozí stav*	směr x	344	1,77	160	2,12
		směr y	350	1,77	165	2,07
	0°	1	357	1,57	179	2,07
		4	437	1,59	219	2,00
		5	490	1,90	246	2,08
	20°	1	449	1,53	226	2,09
		4	491	1,53	246	1,94
		5	528	1,59	265	2,06

Kde: F_{\max} je síla na maximu křivky, d_{\max} průhyb vzorku odpovídající F_{\max} , F_b je síla při úplné penetraci, d_f průhyb vzorku odpovídající F_b .

Z výsledků provedených zkušebních sérií se jeví, že směřování zkoušek mechanických vlastností UFG materiálů metodou penetračních testů na vzorcích malých rozměrů je velmi perspektivní.

5 CELKOVÉ VYHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ A NÁVRH DALŠÍHO VÝVOJE

5.1 Celkové vyhodnocení

Z dosud získaných výsledků se jeví, že nový návrh geometrie protlačovacího kanálku ECAP proces zefektivňuje. Byl prokázán jednoznačně pozitivní vliv na přetvárný odpor. K nejintenzivnějšímu zpevnění dochází ve čtvrtém a pátém průchodu protlačování nástrojem s vychýlením horizontálního kanálu 20°. Maximální hodnoty přetvárného odporu byly v rozsahu $\sigma_{pmax} = 670 - 780$ MPa. Stejně tak metalografická hodnocení prokázala zintenzivnění a zjemnění zrna již po prvním průchodu. Střední velikost zrn zde dosahovala velikosti v rozsahu cca 0,5 μm až 3 μm . V pátém průchodu s vychýlením 20° bylo dosaženo střední velikosti zrn 0,2 μm až 0,7 μm .

Z hlediska praktického využití jsou dosažené výsledky přínosem pro další rozvoj výroby UFG materiálů, v tomto případě také pro firmu Al Invest Břidličná, která dodala slitiny hliníku pro výrobu vzorků k experimentům. Tato problematika se řeší v celosvětovém měřítku. Postupem času přibývá stále více pracovišť zabývajících vývojem nanostrukturních SPD technologií. V mnoha případech se jedná o zařízení uvedené do poloprovozu. Každé nové poznatky v tomto odvětví vývoje jsou velice cenné.

Návrh zkušební metodiky (zkoušky mechanických a tvářecích vlastností) a výsledky jejího řešení přinášejí komplexnější přístup k normativnímu zkoušení materiálů s použitím vzorků s malými rozměry. Dále rozšiřuje současné poznatky v oblasti použití penetračních testů aplikované na UFG materiálech a v neposlední řadě pomáhá řešit problematiku metalografického studia vybraných typů hliníkových slitin, která je obecně považována jako problematická.

5.2 Návrh dalšího vývoje

V současné době probíhají v laboratoři tváření VŠB – TU Ostrava zkoušky s hořčíkovými slitinami. Tyto materiály vyžadují ohřev na teplotu potřebnou k protlačení kanálem. K tomu slouží elektrická pec na ohřev vzorků (příloha č. 15). Z důvodu udržení teploty na požadované hodnotě byla vyrobena speciální topná manžeta, která je schopna udržet teplotu nástroje a její bandáže na požadované hodnotě. Je vybavena termočlánkem a řízena regulátorem teploty (příloha č. 16). Kromě slitin hořčíku se staly předmětem výzkumu zkoušení také kompozitní materiály. Obě tyto skupiny materiálů nacházejí využití v mnoha odvětvích průmyslu, například: automobilový, kosmický a vojenský.

Rovněž se intenzivně pracuje na návrhu nového nástroje ECAP pro ještě větší zefektivnění celého procesu – větší vnesená efektivní deformace, větší zpevnění a homogenní struktura s příznivou střední velikostí zrn po jednom průchodu nástrojem. Jedná se o vzájemnou kombinaci a propojení nástroje technologií ECAP a Twist Extrusion. Neustálé zefektivňování těchto procesů je v souladu s vývojem výzkumu v této oblasti ve světě.

Vývoj se na VŠB – TU Ostrava nesoustřeďuje jen na zefektivňování procesu ECAP, pro vzorky čtvercových průřezů, ale v současnosti je v konečné fázi výroby prototyp zařízení Conform pro protlačování pásů plechů (příloha č. 17). Toto zařízení rovněž obsahuje nástroj, který materiál zpevňuje. Byla provedena již řada zkoušek, při kterých je stroj nutno nastavit tak ,aby se docílilo plynulosti a efektivnosti procesu.

Seznam použité literatury

- [1] RAGHAVAN, S. PRABIR, K. BALAKRISHNA, CH. SWENSON, D. Continuous Severe Plastic Deformation Processing of Aluminum Alloys, *Final Technical Report*, DOE Award Number: DE-FC36-01ID14022, 2006
- [2] GUTKIN, M. Yu. OVIDKO, I. A. PANDE, C. S. Theoretical models of plastic deformation processes in nanocrystalline materials. *Rev. Adv. Mater. Sci*, 2001, no. 2, p. 80 – 102.
- [3] BOURKE MAM. LI.S., BEYERLEIN, I.J., ALEXANDER, D.J., CLAUSEN, B. Finite element analysis of the plastic deformation zone and working load in equal channel angular extrusion, *Material Science Engineering*, July 2003, vol. 49, p. 185 - 204.
- [4] ZRNÍK, J., et al. *Evropská strategie výrobních procesů 4 : Příprava ultrajemnozrnných a nanokrystalických kovových materiálů extrémní plastickou deformací a jejich vlastnosti*. Ostrava : Repronis, 2007. 76 s. ISBN 978-80-7329-153-2.
- [5] ROSOCHOWSKI, A., OLEJNIK, L., RICHERT, M. 3D-ECAP of Square Aluminium Billets. In *Advanced Methods in Material Forming*. Berlin : Springer Berlin Heidelberg, 2007. s. 215-232. ISBN 978-3-540-698.
- [6] INWAHASHI, Y. – WANG, J. – HORITA, Z. – NEMOTO, M., LANGDON, T. G. Principle of equal channel angular pressing for processing of ultra – fine grained materials. *Scripta Materialica*, vol. 35, 1995, p. 143 – 147.
- [7] VALIEV, R. Z., LANGDON, T. G. Some new trends in SPD processing for fabrication of bulk nanostructured materials. *Materials Science Forum, Nanomaterials by Severe Plastic Deformation*, Vol. 503-504 (2006), Trans Tech Publications, p. 3 – 10.

- [8] SEGAL, V.M. Materials processing by simple shear, *Material Science and Engineering*, Texas, Elsevier 1995, p. 157 – 164.
- [9] HEBERSBERGER, T. – VORHAUER, A. – WADSACK, R. Herstellung, Struktur und Eigenschaften von nanokristallinen metalischen Werkstoffen. *BHM*, 2002, 147. Jg., Heft 11.
- [10] WU, Y. – BAKER, I. *Scripta materialia*, 1997, p. 437
- [11] HUANG, J.Y. – ZHU, Y.T. – LOWE, T.C. *Acta Materialia*, 2001, p. 1497 – 1505
- [12] BEYGELZIMER, Y., et al. Kinematics of metal flow during twist extrusion investigated with a new experimental method. In *Journal of materials processing technology*. 209th edition. [s.l.] : Elsevier B. V., 2008. s. 3650-3656.
- [13] ORLOV, Dmitry, et al. Evolution of Microstructure and Hardness in Pure Al by Twist Extrusion. In *Materials Transactions, Vol. 49, No. 1 : Special Issue on Severe Plastic Deformation for Production of Ultrafine Structures and Unusual Mechanical Properties*. The Japan Institute of Metals : [s.n.], 2008. s. 2-6. ISSN 1347-5320.
- [14] ROSOCHOWSKI, A., OLEJNIK, L. Finite element analysis of two-turn Incremental ECAP. In *International Journal of Material Forming : Engineering*. Paris : Springer, 2008. s. 483-486. ISSN 1960-6214.
- [15] RUSZ, S., MICHENKA, V., MALANÍK, K., GOTTWALD, M.. Výzkum vlivu extrémních podmínek deformace na sub-mikrostrukturu kovů a zkušebních metod pro diagnostiku jejich technologických vlastností. *Hutnické listy*: Ocelot Ostrava 2009, roč. 62, č. 2, s. 84-94. Vydavatelství.

Seznam příloh

Příloha č. 1 – Vliv počtu průchodů na zpevnění materiálu; slitina AlFe1,5Mn;
2.průchod

Příloha č. 2 – Vliv počtu průchodů na zpevnění materiálu; slitina AlFe1,5Mn;
3. průchod

Příloha č. 3 – Vliv počtu průchodů na zpevnění materiálu; slitina AlFe1,5Mn;
4. průchod

Příloha č. 4 – Vliv počtu průchodů na zpevnění materiálu; slitina AlMn1Cu;
2. průchod

Příloha č. 5 – Vliv počtu průchodů na zpevnění materiálu; slitina AlMn1Cu;
3. průchod

Příloha č. 6 – Vliv počtu průchodů na zpevnění materiálu; slitina AlMn1Cu;
4. průchod

Příloha č. 7 – Vliv změny geometrie na zpevnění materiálu; slitina AlFe1,5Mn;
vychýlení 10°

Příloha č. 8 – Vliv změny geometrie na zpevnění materiálu; slitina AlMn1Cu;
vychýlení 10°

Příloha č. 9 – Vyhodnocení struktury slitiny AlMn1Cu po prvním průchodu.

Příloha č. 10 – Vyhodnocení struktury slitiny AlMn1Cu po pátém průchodu u nástroje
bez vychýlení horizontálního kanálu.

Příloha č. 11 – Vyhodnocení struktury slitiny AlMn1Cu po pátém průchodu u nástroje
s vychýlením horizontálního kanálu 20°.

Příloha č. 12 – Vyhodnocení struktury slitiny AlFe1,5Mn po prvním průchodu.

Příloha č. 13 – Vyhodnocení struktury slitiny AlFe1,5Mn po pátém průchodu nástrojem bez vychýlení horizontálního kanálu.

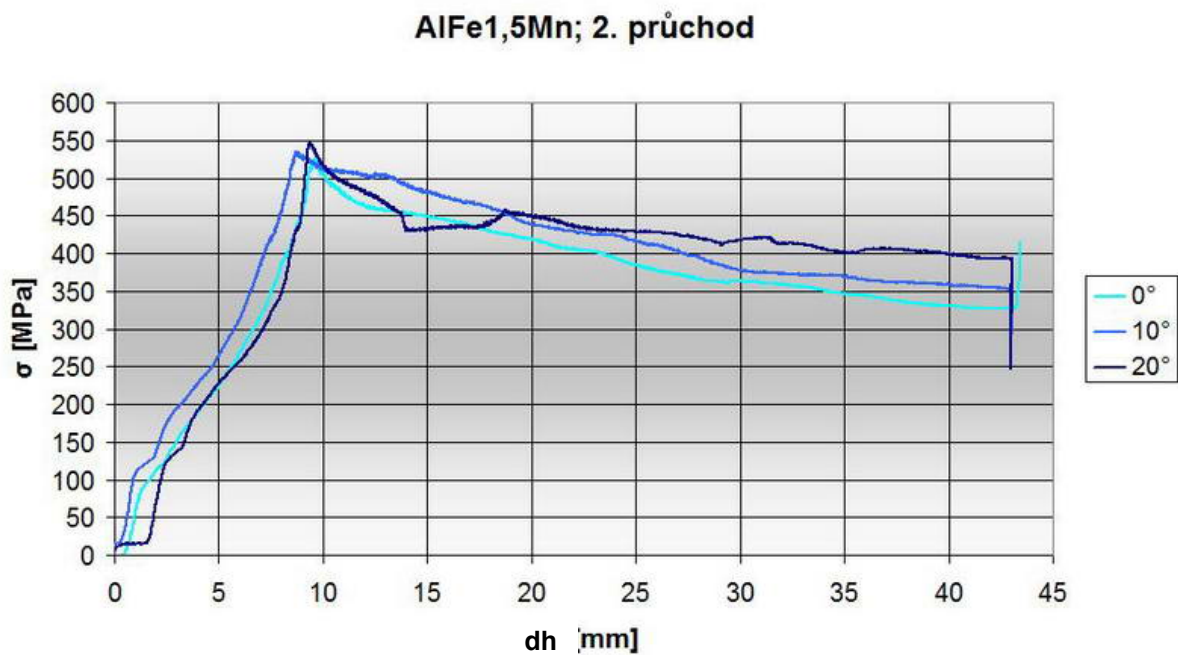
Příloha č. 14 – Vyhodnocení struktury slitiny AlFe1,5Mn po pátém průchodu nástrojem s vychýlením horizontálního kanálu 20°.

Příloha č. 15 – Elektrická pec pro ohřev vzorků.

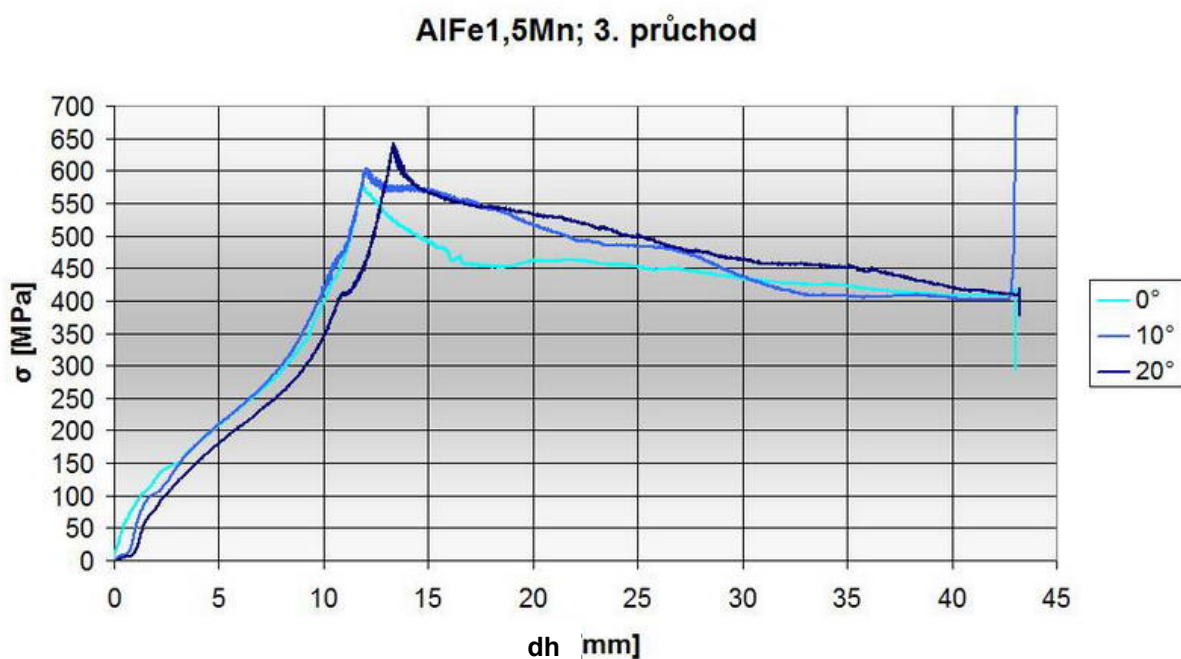
Příloha č. 16 – Topná manžeta a regulátor.

Příloha č. 17 – Zařízení Conform.

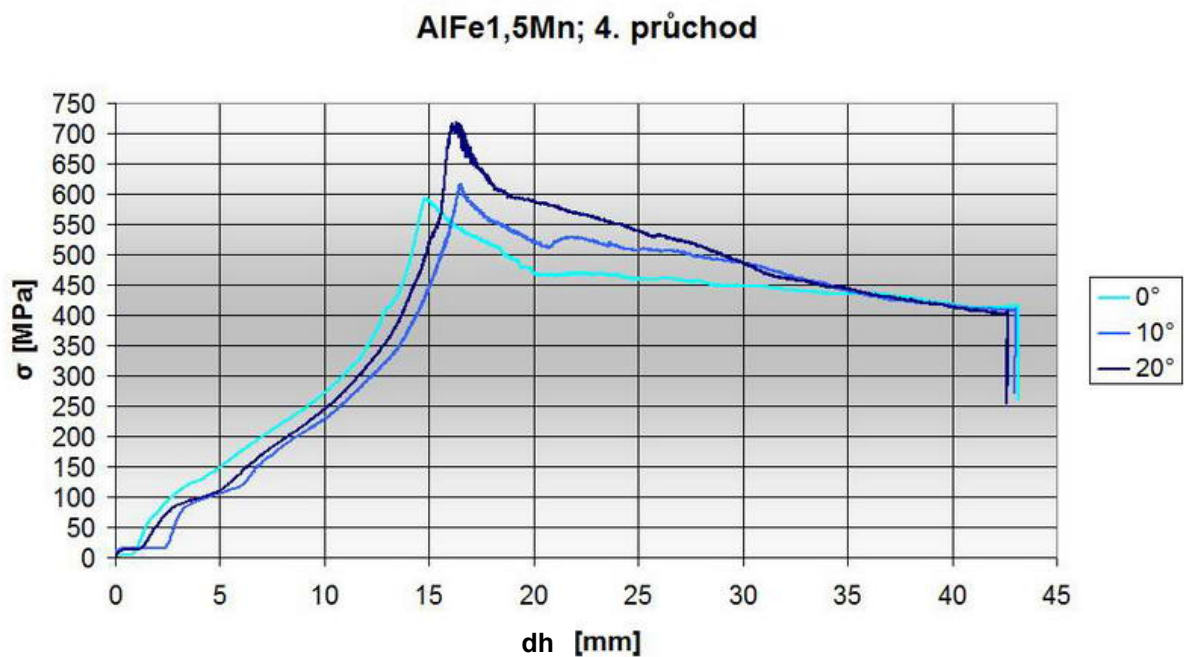
Příloha č. 1 – Vliv počtu průchodů na zpevnění materiálu; slitina AlFe1,5Mn;
2.průchod



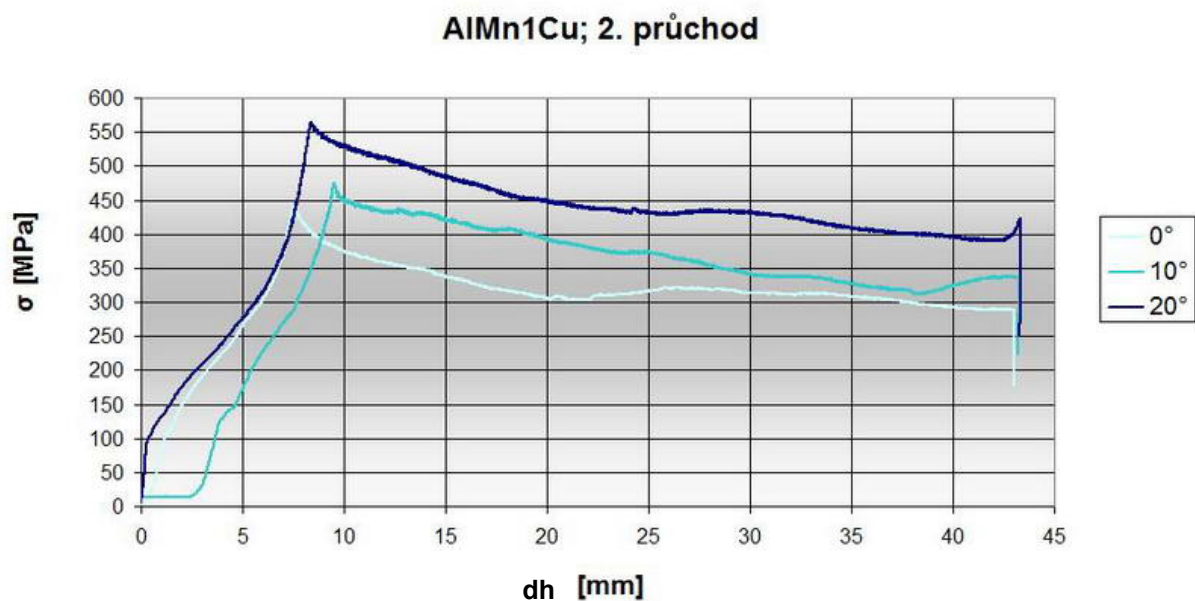
Příloha č. 2 – Vliv počtu průchodů na zpevnění materiálu; slitina AlFe1,5Mn;
3. průchod



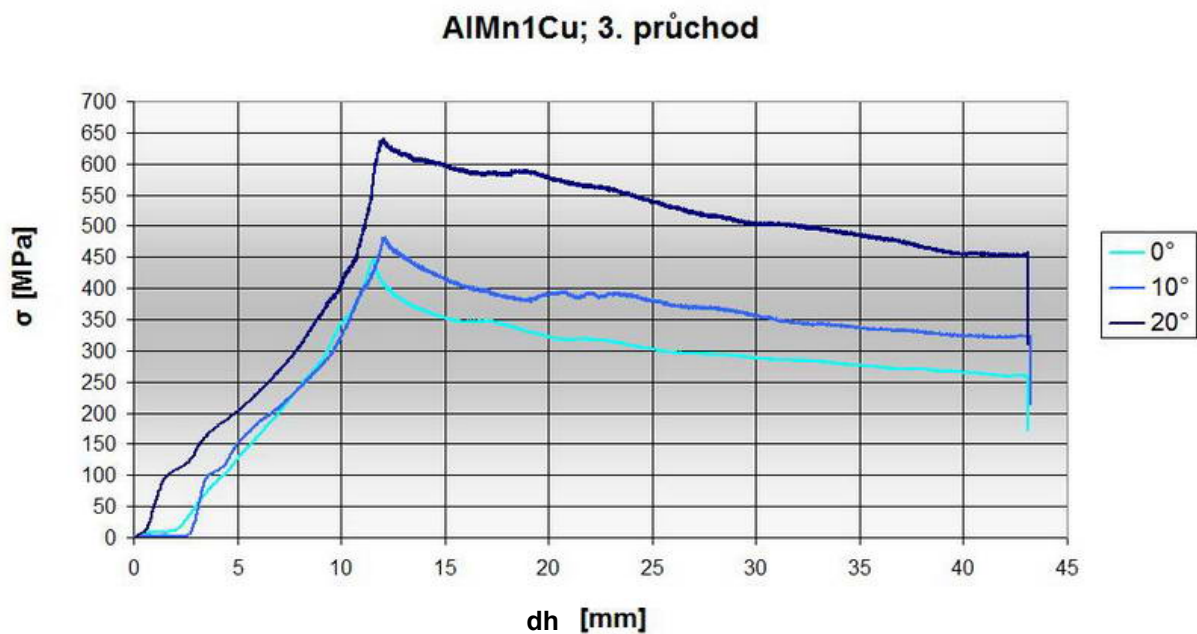
Příloha č. 3 – Vliv počtu průchodů na zpevnění materiálu; slitina AlFe1,5Mn;
4. průchod



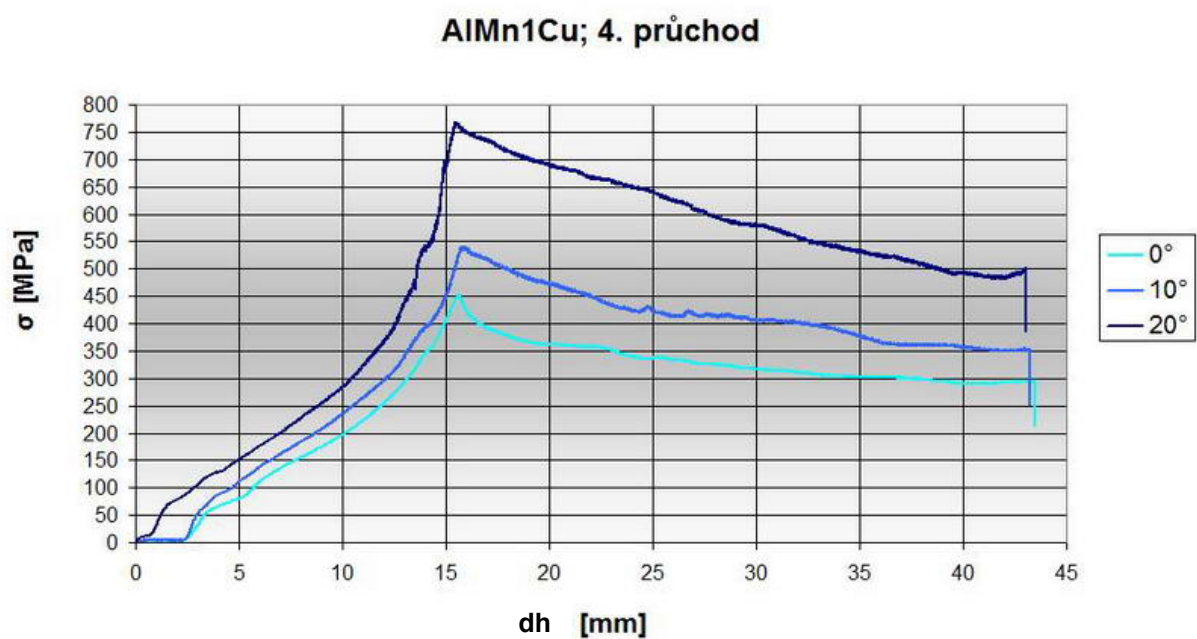
Příloha č. 4 – Vliv počtu průchodů na zpevnění materiálu; slitina AlMn1Cu;
2. průchod



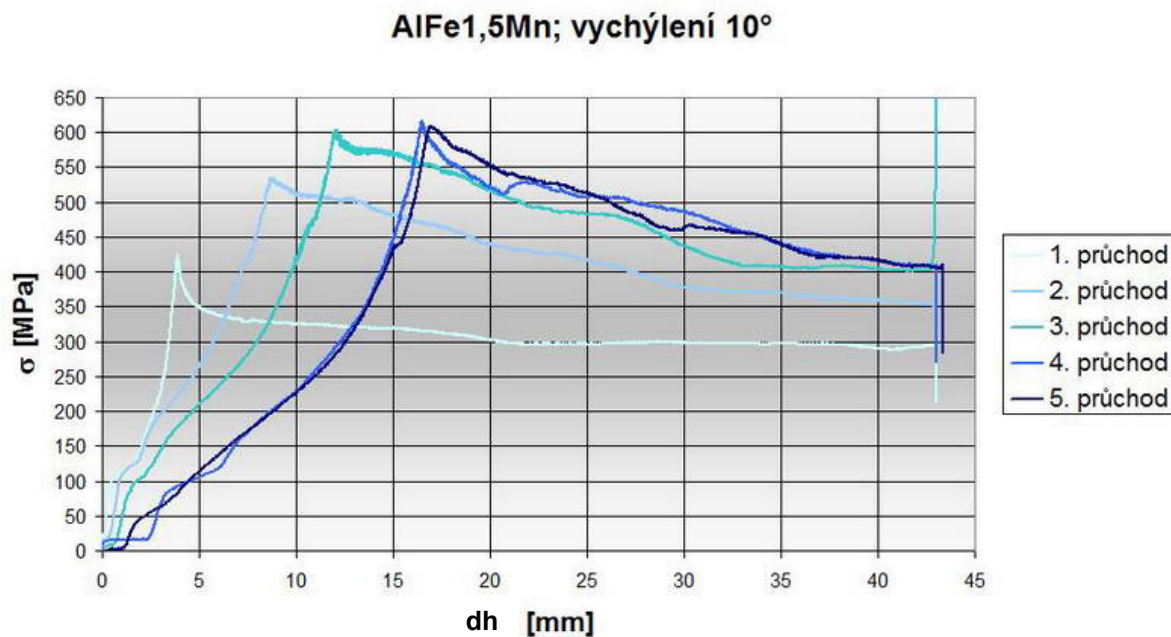
Příloha č. 5 – Vliv počtu průchodů na zpevnění materiálu; slitina AlMn1Cu;
3. průchod



Příloha č. 6 – Vliv počtu průchodů na zpevnění materiálu; slitina AlMn1Cu;
4. průchod

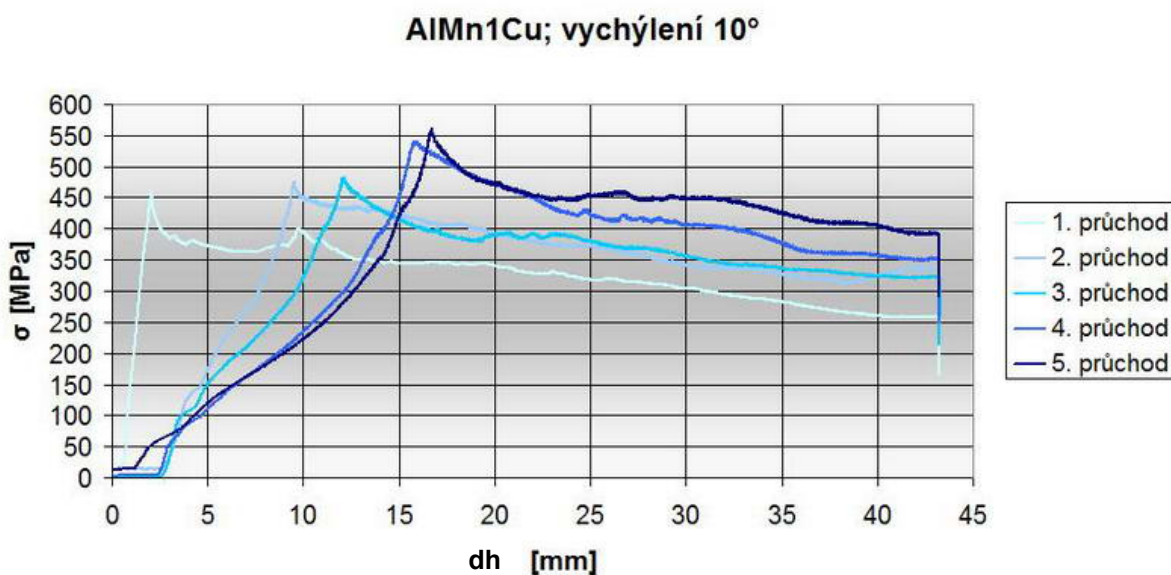


**Příloha č. 7 – Vliv změny geometrie na zpevnění materiálu; slitina AlFe1,5Mn;
vychýlení 10°**



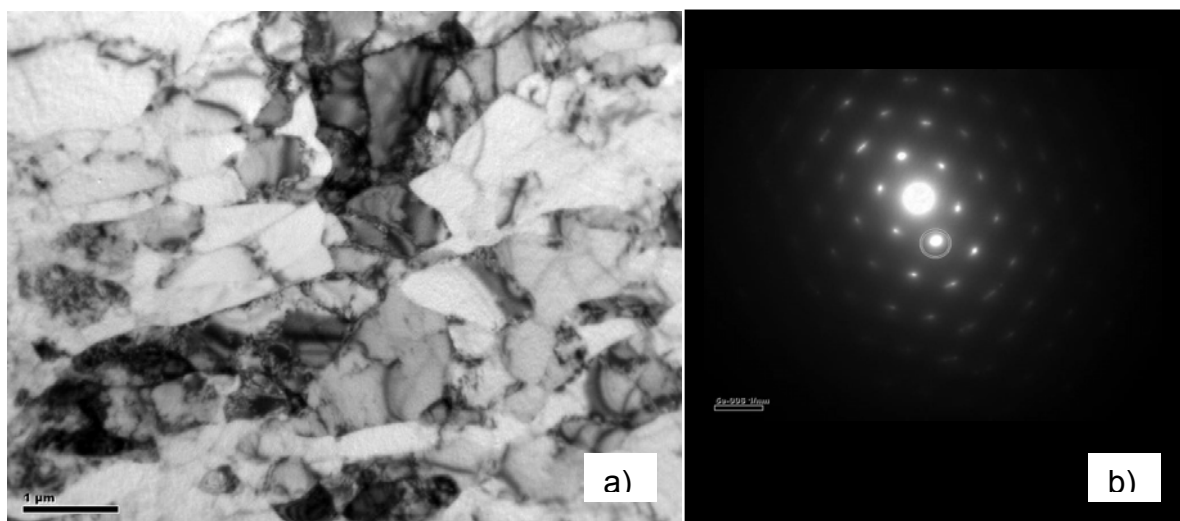
Slitina AlFe1,5Mn protlačena nástrojem s vychýlením 10°.

**Příloha č. 8 – Vliv změny geometrie na zpevnění materiálu; slitina AlMn1Cu;
vychýlení 10°**



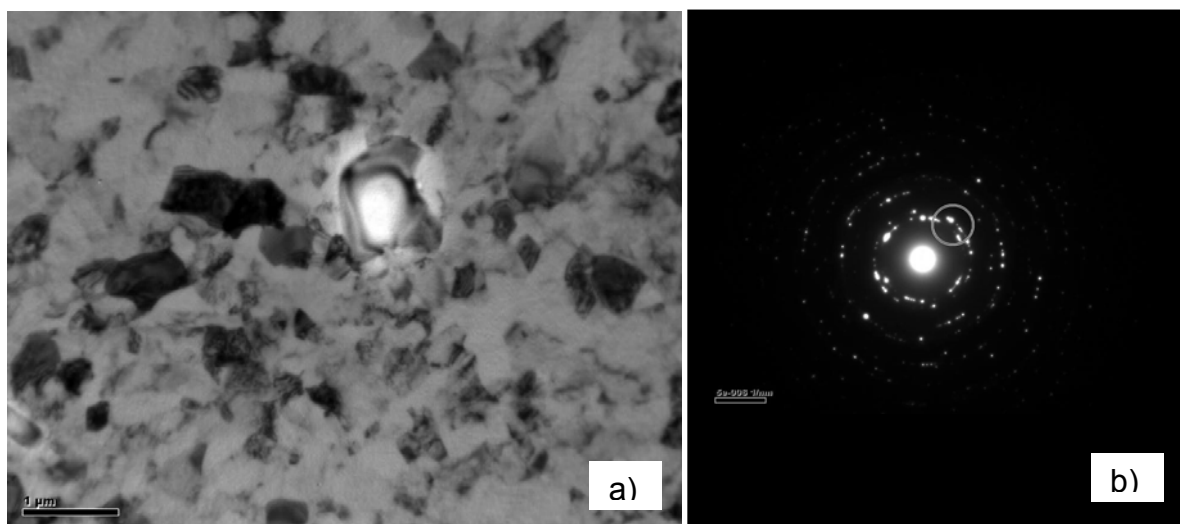
Slitina AlMn1Cu protlačena nástrojem s vychýlením 10°.

Příloha č. 9 – Vyhodnocení struktury slitiny AlMn1Cu po prvním průchodu.



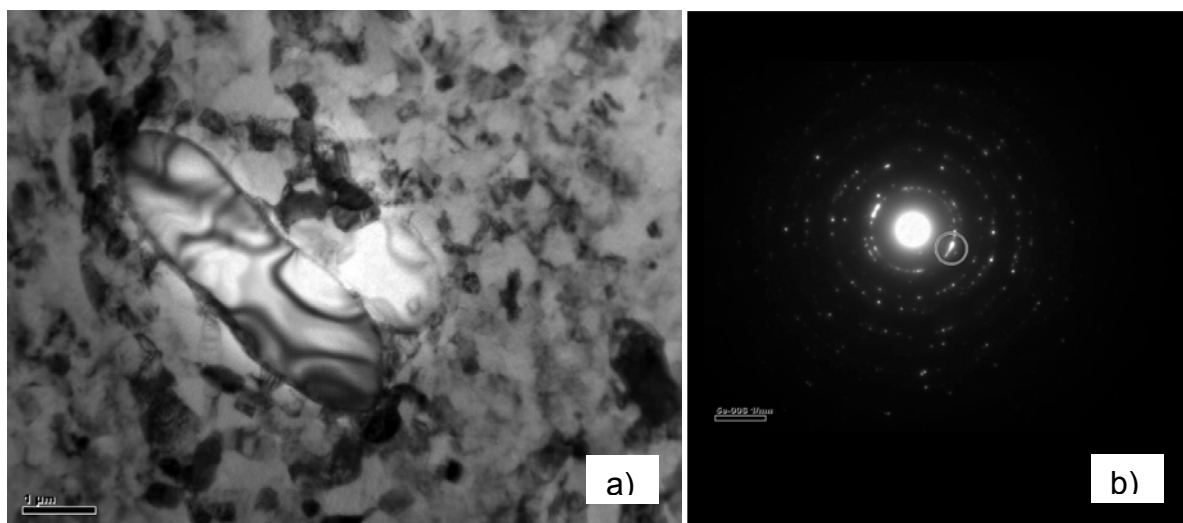
a) TEM snímek struktury po prvním průchodu, b) model SAED.

Příloha č. 10 – Vyhodnocení struktury slitiny AlMn1Cu po pátém průchodu u nástroje bez vychýlení horizontálního kanálu.



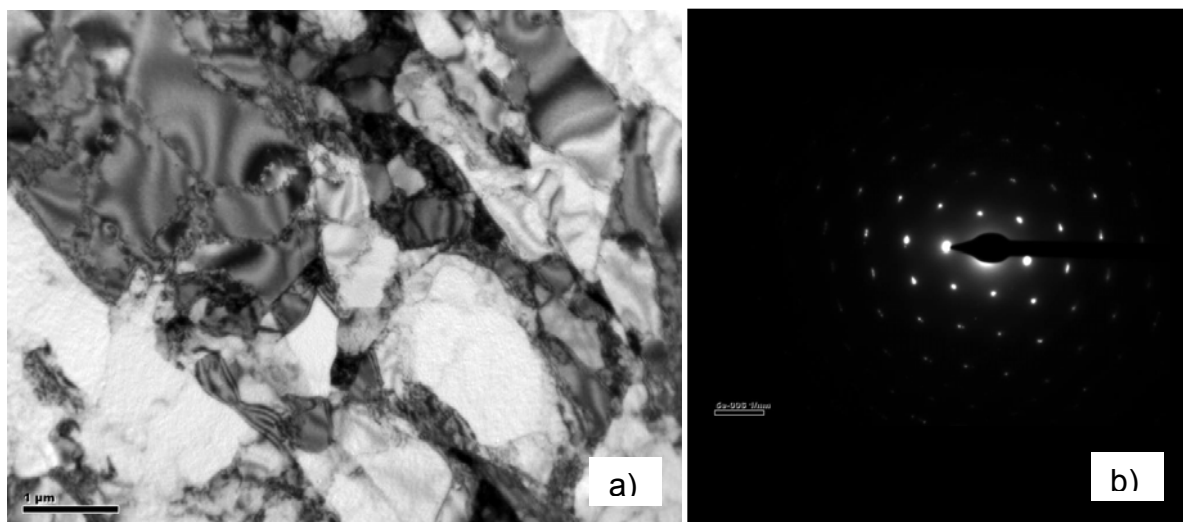
a) TEM snímek struktury po pátém průchodu bez vychýlení kanálu, b) model SAED.

Příloha č. 11 – Vyhodnocení struktury slitiny AlMn1Cu po pátém průchodu u nástroje s vychýlením horizontálního kanálu 20°.



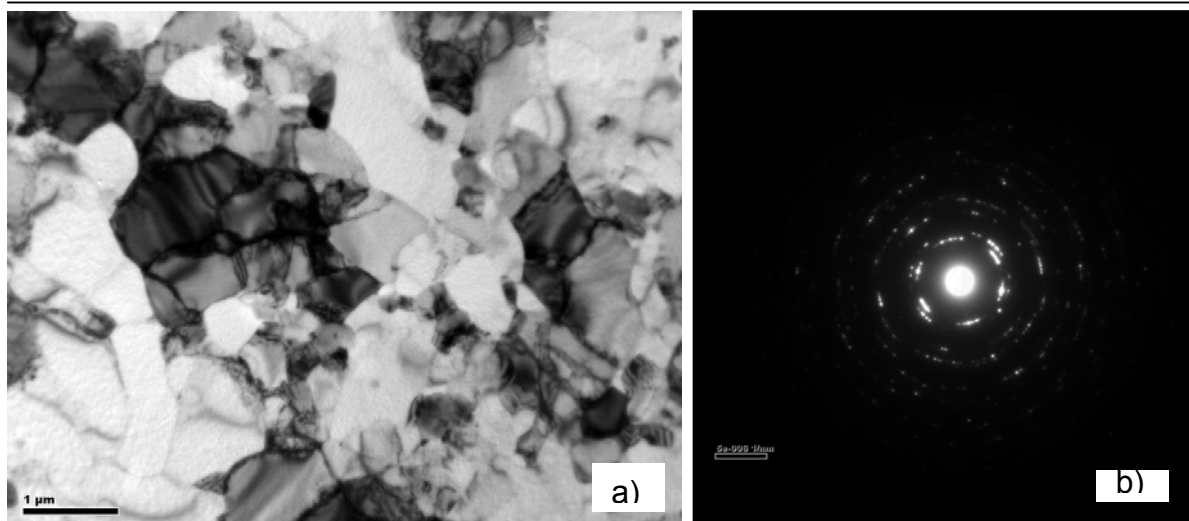
a) TEM snímek struktury po pátém průchodu s vychýlením 20°, b) model SAED.

Příloha č. 12 – Vyhodnocení struktury slitiny AlFe1,5Mn po prvním průchodu.



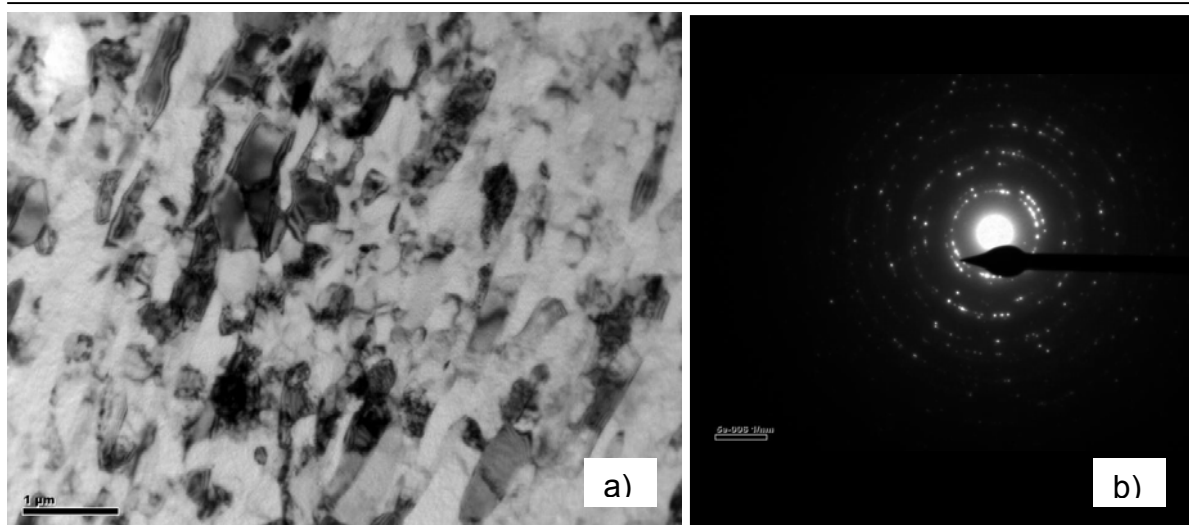
a) TEM snímek struktury po prvním průchodu, b) model SAED.

Příloha č. 13 – Vyhodnocení struktury slitiny AlFe1,5Mn po pátém průchodu nástrojem bez vychýlení horizontálního kanálu.



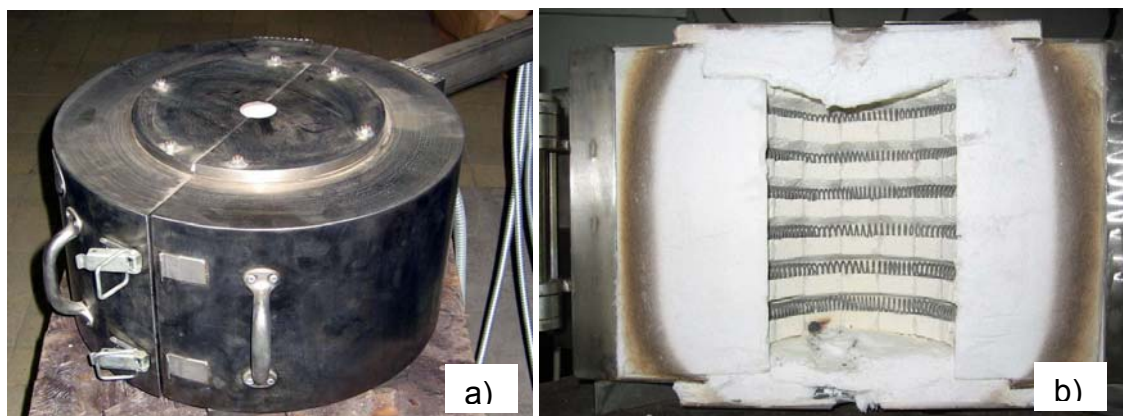
a) TEM snímek struktury po pátém průchodu bez vychýlení kanálu, b) model SAED.

Příloha č. 14 – Vyhodnocení struktury slitiny AlFe1,5Mn po pátém průchodu nástrojem s vychýlením horizontálního kanálu 20°.



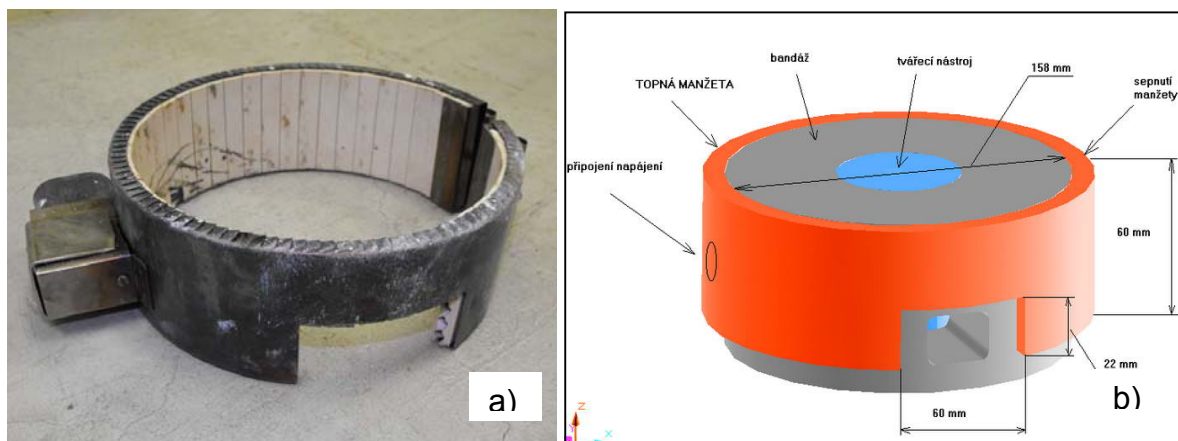
a) TEM snímek struktury po pátém průchodu s vychýlením 20°, b) model SAED.

Příloha č. 15 – Elektrická pec pro ohřev vzorků.



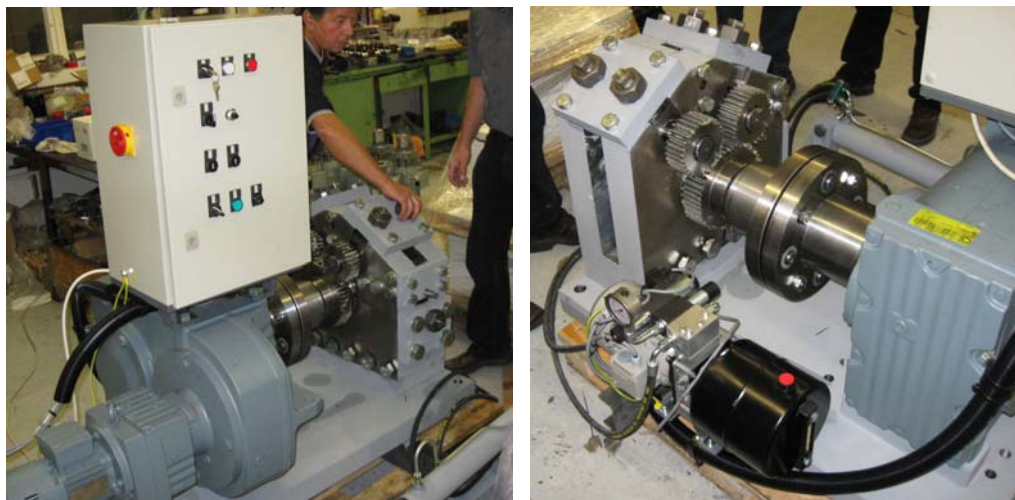
a) elektrická pec, b) topné spirály v prostoru uvnitř pece.

Příloha č. 16 – Topná manžeta a regulátor.



a) Topná manžeta, b) model manžety instalované na bandáži s nástrojem
c) regulátor

Příloha č. 17 – Zařízení Conform.



Zařízení Conform, pro pásy plechů, v konečné fázi výroby.